

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ante Rosandić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Student:

Ante Rosandić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru na iznimnom trudu i vremenu uloženom u izradi ovog diplomskog rada, te svim njegovim savjetima i kritikama koje su ovaj rad učinile boljim.

Također se zahvaljujem svim djelatnicima Zavoda, profesorima i asistentima a ponajviše kolegicama i kolegama s kojima sam dijelio svoje studentske dane.

Zahvaljujem se i izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću te Ivanu Muniću, dipl. ing. na savjetima i pomoći tijekom studiranja.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Mirjani i Željku, sestri Aniti i djevojci Vinki koji su vjerovali u mene tijekom čitavog studija.

Ante Rosandić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ante Rosandić** Mat. br.: 0035193272

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **HIDROELASTIČNI ODZIV ULTRA VELIKOG KONTEJNERSKOG BRODA NOSIVOSTI 19000 TEU PREMA WHISP METODOLOGIJI**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **HYDROELASTIC RESPONSE OF 19000 TEU ULTRA LARGE CONTAINER SHIP ACCORDING TO THE WHISP METHODOLOGY**

Opis zadatka:

Za sigurno osnivanje konstrukcije ultra velikih kontejnerskih brodova nužna je provedba direktnih proračuna hidroelastičnim proračunskim modelima. Hidroelastična analiza može se provesti na različitim razinama složenosti i točnosti, ovisno o složenosti i točnosti strukturnog i hidrodinamičkog modela koji se sprežu, kao i o samom postupku sprežanja. U svijetu postoji nekoliko relevantnih računalnih alata za hidroelastičnu analizu brodskih i pomorskih konstrukcija, pri čemu se svaki od alata treba koristiti prema odgovarajućoj metodologiji. U ovom diplomskom radu potrebno je provesti hidroelastičnu analizu ultra velikog kontejnerskog broda nosivosti 19000 TEU, koji se gradi u južnokorejskom brodogradilištu Hyundai Heavy Industries, sprežanjem 3D modela konačnih elemenata konstrukcije i hidrodinamičkog modela potencijalnog strujanja. Potrebno je koristiti programski paket HOMER, ustupljen od klasifikacijskog društva Bureau Veritas, Pariz, u skladu s WhiSp metodologijom, pri čemu problem treba razmotriti na WhiSp1 razini. Zadatak treba sadržavati:

- opis osnovne problematike vezane za hidroelastičnost brodskih i pomorskih konstrukcija,
- suvremene pristupe u analizi hidroelastičnosti brodskih i pomorskih konstrukcija,
- opis korištene programske podrške,
- opis WhiSp metodologije,
- detaljan tehnički opis analiziranog plovila i numeričkih modela (strukturni i hidrodinamički),
- proračun zamornog vijeka s utjecajem linearnog pruženja za odabrani detalj konstrukcije,
- analizu rezultata proračuna.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

27. rujna 2018.

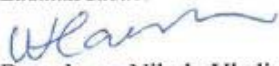
Datum predaje rada:

29. studenog 2018.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 7. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Opis osnovne problematike vezane za hidroelastičnost brodskih i pomorskih konstrukcija .....	4
1.2. Problem zamora brodske konstrukcije .....	4
2. SUVREMENI PRISTUPI U ANALIZI HIDROELASTIČNOSTI BRODSKIH I POMORSKIH KONSTRUKCIJA .....	8
2.1. Modelska ispitivanja.....	10
2.2. Numeričke simulacije.....	13
2.2.1. Hidrodinamički model .....	15
2.2.2. Hidrostatički model.....	16
2.2.3. Hidroelastični model.....	17
2.3. Ispitivanja u naravi .....	21
3. OPIS PRORAČUNSKE METODOLOGIJE.....	25
3.1. <i>WhiSp1</i> .....	26
3.2. <i>WhiSp2</i> .....	28
3.3. <i>WhiSp3</i> .....	30
4. OPIS PROGRAMSKE PODRŠKE .....	32
4.1. Programski paket HOMER.....	32
4.2. Postupak proračuna .....	33
5. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOG BRODA I KORIŠTENIH NUMERIČKIH MODELA .....	35
5.1. Glavne značajke i dimenzije analiziranog broda.....	37
5.2. Numerički model.....	37
6. PRORAČUN ZAMORNOG VIJEKA BRODA S UTJECAJEM LINEARNOG PRUŽENJA .....	42
7. ZAKLJUČAK.....	55

---

LITERATURA.....	56
PRILOG .....	60

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Trend rasta kontejnerskog prijevoza u milijunima TEU [1] .....	1
Slika 2.	Kapacitet kontejnerskih brodova u milijunima DWT [3] .....	2
Slika 3.	Povijesni razvoj kontejnerskih brodova [5].....	3
Slika 4.	Shema proračuna dinamičke analize [6] .....	6
Slika 5.	Načini provođenja analize; a) numerička simulacija, b) modelska ispitivanja, c) mjerenja u naravi [7] .....	10
Slika 6.	Segmentni model [8] .....	10
Slika 7.	Dijagram toka spektralne analize zamora .....	14
Slika 8.	Froude-Krylovljeva korekcija tlaka za valni brijeg i dol [21].....	15
Slika 9.	Vrpčasta diskretizacija pramca za proračun udaranja o valove [4].....	16
Slika 10.	Rezultat prijenosa pomaka sa strukturne na hidrodinamičku mrežu [21] .....	18
Slika 11.	Karakterističan izgled prijenosne funkcije odziva [4].....	20
Slika 12.	Postupak proračuna za <i>WhiSp1</i> razinu, S-strukturni odziv, H- hidrodinamičko opterećenje [21].....	26
Slika 13.	Svjetska mora podijeljena u 104 geografska područja [36] .....	27
Slika 14.	Koncept povišenog stanja mora za ubrzanje konvergencije rezultata.....	29
Slika 15.	Postupak proračuna za <i>WhiSp2</i> razinu [21].....	29
Slika 16.	Postupak proračuna za <i>WhiSp3</i> razinu [21].....	31
Slika 17.	Dijagram toka proračuna hidroelastičnosti [6].....	34
Slika 18.	Komunikacija modula unutar programskog paketa HOMER .....	34
Slika 19.	Analizirani kontejnerski brod u plovidbi [39].....	35
Slika 20.	Opći plan analiziranog broda .....	36
Slika 21.	Presjek analiziranog broda na glavnom rebru .....	36
Slika 22.	Globalni model konačnih elemenata ultra velikog kontejnerskog broda .....	39
Slika 23.	Poprečni presjek broda .....	39
Slika 24.	Uzdužni presjek broda.....	40

Slika 25.	Prikaz integracijske mreže.....	40
Slika 26.	Prikaz hidrodinamičke mreže.....	41
Slika 27.	Pozicija analiziranih konstrukcijskih detalja na brodu.....	41
Slika 28.	Moment savijanja na mirnoj vodi i smične sile [40].....	43
Slika 29.	Distribucija hidrostatickog tlaka na oplati broda na mirnoj vodi [40] .....	43
Slika 30.	Pozicioniranje modela s obzirom na slobodnu površinu i savijanje broda na mirnoj vodi [35] .....	44
Slika 31.	Prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja s utjecajem linearnog pruženja za različite susretne kutove.....	45
Slika 32.	Prijenosne funkcije horizontalnog momenta savijanja s utjecajem linearnog pruženja za različite susretne kutove.....	45
Slika 33.	Prijenosne funkcije momenta uvijanja s utjecajem linearnog pruženja za različite susretne kutove .....	46
Slika 34.	Prikaz analiziranih detalja 1-4 .....	46
Slika 35.	Prikaz analiziranih detalja 5-8 .....	47
Slika 36.	Von Mises naprezanja u analiziranom strukturnom detalju za nekoliko uzastopnih susretnih frekvencija.....	48
Slika 37.	Prijenosna funkcija naprezanja sa utjecajem pruženja za detalj 6.....	49
Slika 38.	Primjer ulazne datoteke modula StarSpec programskog paketa HydroSTAR za provedbu spektralne analize .....	50
Slika 39.	Doprinos pojedinih stanja mora zamornom oštećenju strukturnog detalja .....	53
Slika 40.	Doprinos susretnog kuta zamornom oštećenju strukturnog detalja.....	54



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. . Različiti oblici hidrostrukturnih interakcija [21].....	14
Tablica 2. <i>WhiSp</i> metodologija .....	26
Tablica 3. Tehnički podaci analiziranog broda .....	37
Tablica 4. Zamorni vijek detalja brodske konstrukcije [god] za svjetsko stanje mora .....	51
Tablica 5. Zamorni vijek detalja brodske konstrukcije [god] za plovidbu u Sjevernom Atlantiku.....	52

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$v$	čv	Brzina broda
$v_s$	čv	Brzina broda u službi
$\omega_e$	rad/s	Susretna frekvencija
$m$	t	Modalna matrica mase konstrukcije
$A$	t	Modalna pridružena masa
$B$		Modalno hidrodinamičko prigušenje
$b$		Modalna matrica prigušenja
$k$		Modalna matrica krutosti
$C$		Povratna krutost
$\xi$		Modalna amplituda
$F^{DI}$		Modalna hidrodinamička uzbuda
$h^i$		Modalni pomak
$H$		Ukupni pomak pojedine točke
$R$		Oznaka za krute dijelove
$E$		Oznaka za elastične dijelove
$A^\infty$		Modalna matrica beskonačne frekvencije
$\dot{\xi}$		Vektor pomaka
$F$		Linearni vektor uzbudne sile
$Q$		Nelinearni vektor uzbudne sile
$L_{OA}$	m	Duljina broda preko svega
$L_{PP}$	m	Duljina broda između okomica
$B$	m	Širina broda
$H$	m	Visina broda
$Td$	m	Projektni gaz
$T_s$	m	Gaz na ljetnoj vodnoj liniji
$\Delta$	t	Nosivost na punom gasu

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu provedena je hidroelastična analiza ultra velikog kontejnerskog broda nosivosti 19000 TEU, sprežanjem 3D modela konačnih elemenata konstrukcije i 3D hidrodinamičkog modela potencijalnog strujanja. Korišten je programski paket HOMER, ustupljen od klasifikacijskog društva Bureau Veritas, Pariz. Proračun je proveden u skladu s *WhiSp* metodologijom, i to na *WhiSpI* razini koja definira postupak spektralne analize zamora s utjecajem linearnog pruženja. Tehnička dokumentacija analiziranog broda i 3D model konačnih elemenata konstrukcije ustupljeni su od brodogradilišta *Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.*, iz Ulsana, Južna Koreja, a hidrodinamički model i integracijska mreža generirani su direktno u programskom paketu HOMER. Uz teorijske osnove hidroelastičnosti brodskih i pomorskih konstrukcija, u radu su ukratko opisana modelska ispitivanja, numerički proračuni i ispitivanja u naravi, kao komponente suvremenog integralnog pristupa u istraživanju hidroelastičnosti. Uz opis *WhiSp* metodologije i korištene programske podrške, dan je tehnički opis broda i korištenih proračunskih modela. Rezultati uključuju izračunate razine zamornog vijeka odabranog konstrukcijskog detalja bez utjecaja pruženja i s njim, pri čemu je potvrđeno da linearno pruženje smanjuje eksploatacijski period odabranog strukturnog detalja, te ga je potrebno uzeti u obzir kod direktnih proračuna. Štoviše, imajući u vidu relativno mnogo kombinacija susretnog kuta, valnih frekvencija i brzina broda, koje se moraju uzeti u obzir pri proračunu zamornog oštećenja (što uzrokuje razmjerno dugotrajne proračune), posebice je analiziran utjecaj koraka susretnog kuta na rezultate proračuna.

Ključne riječi: hidroelastičnost, direktni proračun, kontejnerski brod, *WhiSp* metodologija, zamor, metoda konačnih elemenata, potencijalno strujanje.

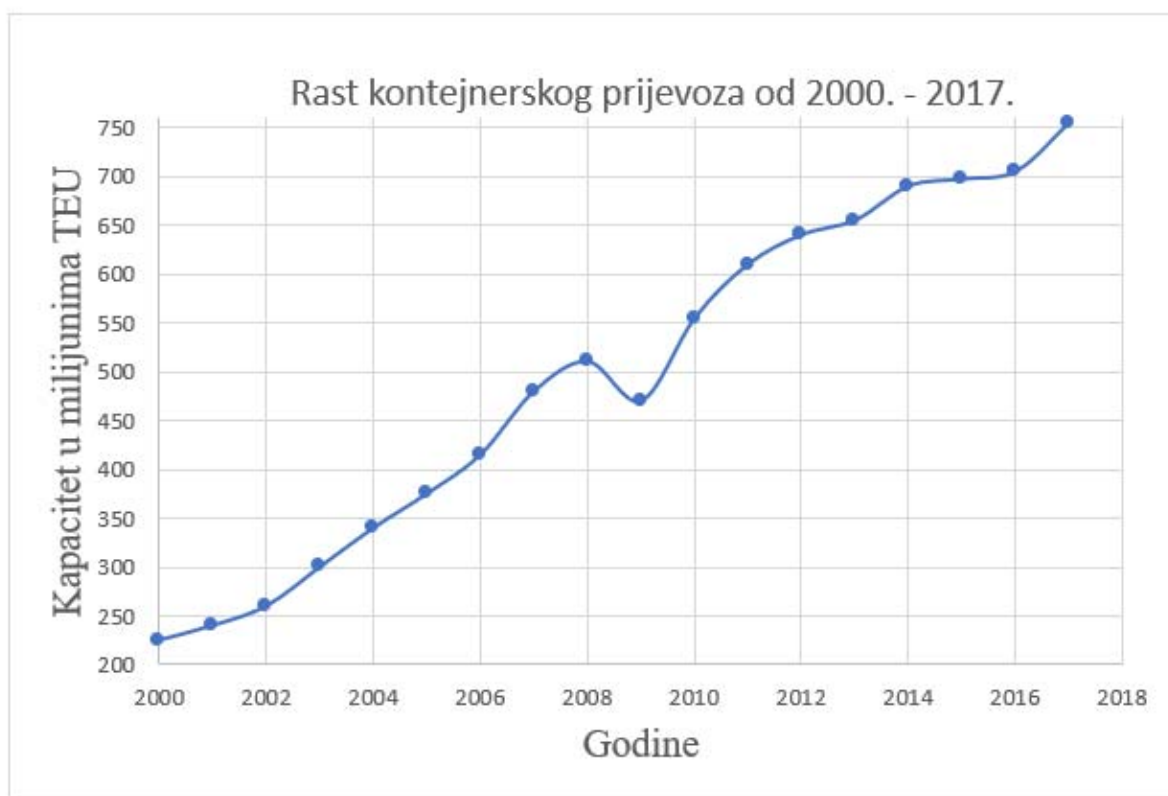
## SUMMARY

In this thesis, the hydroelastic analysis of ultra large container ship of 19,000 TEU is preformed by coupling 3D FEM structural ship model with the 3D potential flow hydrodynamic model. For that purpose, the software HOMER was applied, which has been provided by classification society Bureau Veritas, Paris. The calculation was preformed in accordance with the *WhiSp* methodology, at *WhiSp1* level which defines the procedure of spectral fatigue analysis with linear springing effect. Technical documentation of the analyzed ship and 3D FEM structural ship model were provided from Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Ulsan, South Korea, while hydrodynamic model and integration mesh were generated directly by means of HOMER software. Along with theoretical assumptions of hydroelasticity of ships and offshore structures, short description of model tests, numerical approaches and full-scale measurements, as components of integral hydroelastic assessment approach, are presented. Together with the description of *WhiSp* methodology and used software, technical details of ship and numerical models are given. The results include calculated fatigue damages/lives for certain set of details with effect of springing and without it, whereas it has been confirmed that linear springing reduces exploitation period of structural details, and therefore should be taken into account within the direct calculations. Moreover, bearing in mind relatively large number of combinations of headings, wave frequencies and operating speeds to be taken in the fatigue damage calculations, influence of heading step was considered.

Key words: hydroelasticity, direct calculation, container ship, *WhiSp* methodology, fatigue, finite element method, potential flow.

## 1. UVOD

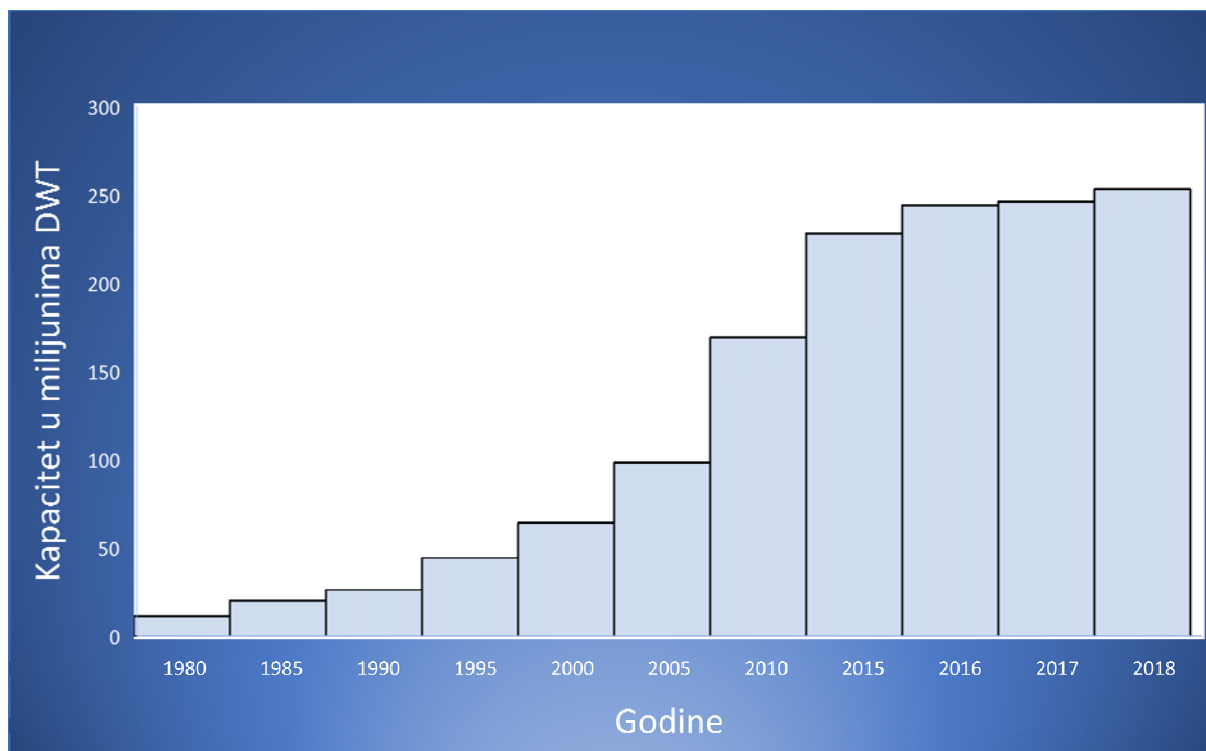
Sredinom 20. stoljeća robna razmjena morem počela je snažno rasti i do danas je kontinuirano, gotovo bez izuzetka, rasla. Rast glavnih svjetskih ekonomskih sila odrazio se i na rast svjetske trgovačke flote. Posljedično, mijenja se kapacitet kontejnerskih brodova kao i sami kontejnerski brodovi. Na Slici 1, prikazana je krivulja rasta kontejnerskog prijevoza od 2000. – 2017. godine u milijunima TEU (eng. *Twenty feet equivalent unit*).



Slika 1. Trend rasta kontejnerskog prijevoza u milijunima TEU [1]

Uvođenjem univerzalne veličine kontejnera 20 x 8 x 8,5 stopa ili kraće 1 TEU započinje njihova značajnija upotreba u pomorskom prometu, koja je u porastu sve do danas. Pojava univerzalnih kontejnera i kontejnerizacija trgovine ima enorman utjecaj na sliku globalne ekonomije, što potvrđuje i činjenica da je izumitelj kontejnera uvršten na popis jednim od najvažnijih ljudi 20. stoljeća [2]. U zadnjih 30 godina robna razmjena morem se utrostručila, a

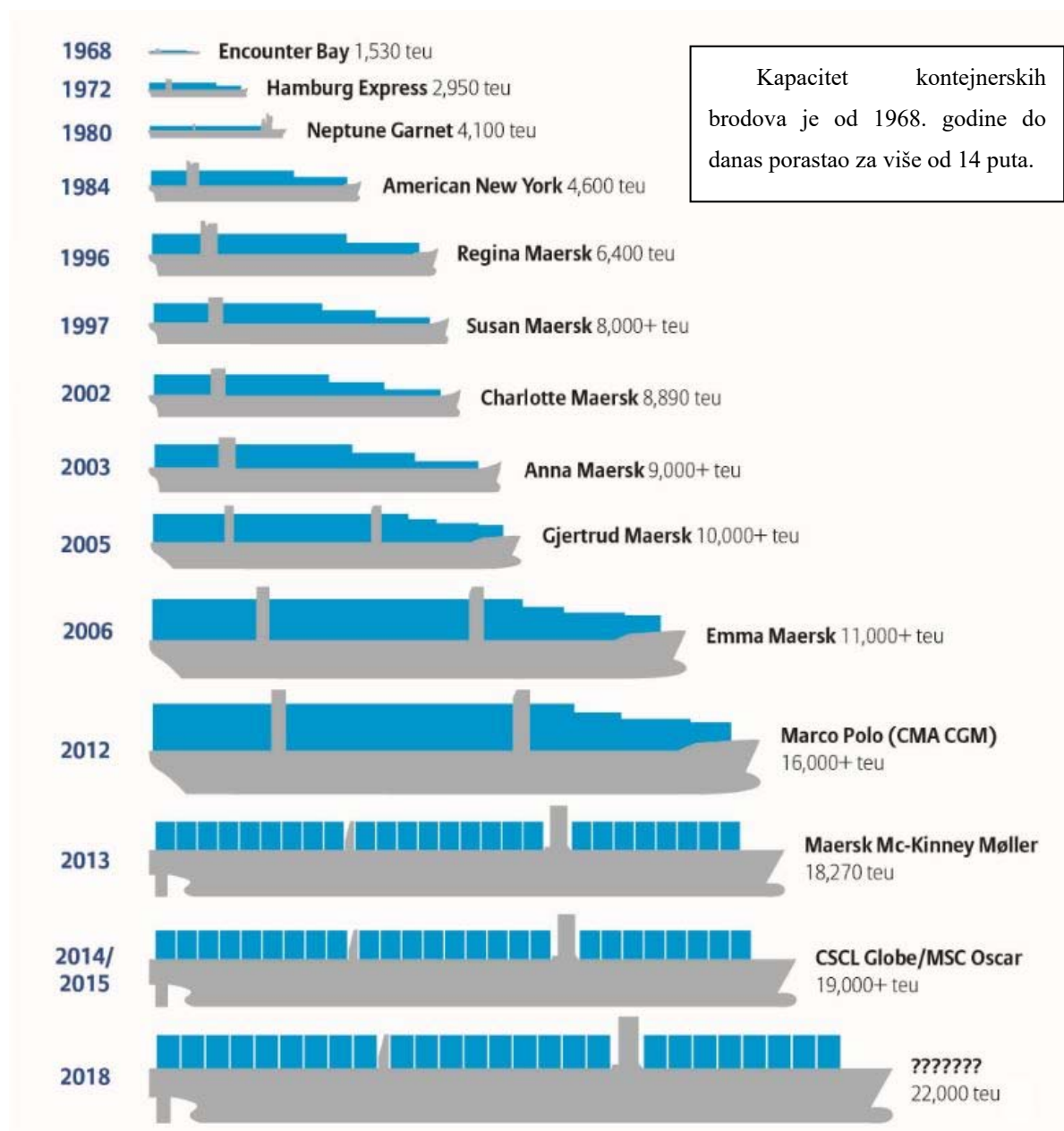
u istom periodu trgovina kontejnerima je rasla više od 10 puta. Te činjenice nam ukazuju da je kontejnerska flota najbrže rastuća flota do danas, što je ilustrirano Slikom 2.



**Slika 2. Kapacitet kontejnerskih brodova u milijunima DWT [3]**

2006. godine, brod *Emma Maersk* pušten je u službu kao prvi brod nove generacije ultra velikih kontejnerskih brodova (*Ultra Large Container Ship*) kapaciteta više od 11000 TEU. Brod Malacca class kapaciteta 18000 TEU izgrađen je u *Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering* za Danskog naručitelja *Maersk Line* [4], a danas su već u realizaciji kontejnerski brodovi s kapacitetom od 23000 TEU.

Projektiranje i gradnja ultra velikih kontejnerskih brodova je veliki izazov za projektante i predmet je intenzivnih istraživanja s obzirom da takvi brodovi odstupaju od uobičajene brodograđevne prakse. Povijesni razvoj kontejnerskih brodova prikazan je na Slici 3.



Slika 3. Povijesni razvoj kontejnerskih brodova [5]

Projekti velikih kontejnerskih brodova potaknuti su ekonomskim faktorom kako bi se jednim brodom transportirao što veći broj kontejnera uz znatno manje troškove gradnje, eksploatacije i mase ugrađenog čelika, a samim time i manjom potrošnjom goriva. S obzirom da takvi brodovi imaju vrlo izražene elastične deformacije poželjno je provoditi istraživanja za eventualnom primjenom novih materijala te napraviti optimizaciju brodske konstrukcije.

### 1.1. Opis osnovne problematike vezane za hidroelastičnost brodskih i pomorskih konstrukcija

Zbog povećanja glavnih konstrukcijskih dimenzija broda i vitkosti forme trupa, prirodne frekvencije njihovih globalnih vibracija mogu pasti do razine uzbude valnog opterećenja. Naime, veliki kontejnerski brodovi zbog eksploatacijskih zahtjeva imaju relativno veliku brzinu plovidbe 25 – 30 čvorova, susretna frekvencija će značajno porasti, što može dovesti do rezonantnog odziva [4].

Kako bi se izbjeglo dovođenje brodova u pogibeljne situacije koristi se tzv. *weather routing* (planiranje rute broda prema vremenskim uvjetima) te brod najčešće plovi u umjerenim stanjima mora. Otkriveno je nekoliko značajnih i važnih fenomena koji se pojavljuju u životnom vijeku broda, a koji se posebice odnose na velike kontejnerske brodove:

- pruženje,
- udaranje pramca o valove,
- podrhtavanje, kao posljedica udaranja pramca o valove.

Pruženje broda (eng. *springing*) predstavljaju rezonantne vibracije do kojih dolazi zbog djelovanja kontinuirane valne uzbude [2].

U takvim slučajevima potrebno je provesti cjelovito istraživanje međudjelovanja između hidrodinamičkog okruženja (morski valovi) i elastične konstrukcije. Osim toga potrebno je provesti potpuno sprezanje hidrodinamičkih i strukturnih modela u slučaju kada impulsno opterećenje kao primjerice udaranje pramca o valove pobuđuje prolazne vibracije trupa broda (eng. *whipping*).

### 1.2. Problem zamora brodske konstrukcije

Praktični postupak proračuna brodske konstrukcije uključuje provjeru dva glavna načina kolapsa konstrukcije:

- popuštanje i izvijanje zbog ekstremnih eksploatacijskih uvjeta,
- zamor materijala koji je uzrokovao pukotine u brodskoj konstrukciji.

Ta dva načina oštećenja su suštinski različita kao i načini njihove analize, iako postoje određena preklapanja. Cilj analize ekstremnih opterećenja i odziva jest predvidjeti najgori mogući događaj za svaki pojedini element konstrukcije za vrijeme eksploatacije broda, dok je



cilj analize zamora materijala analizirati svaki konstrukcijski detalj računajući sve kombinacije raspona naprezanja i broja ciklusa (S-N krivulje) u životnom vijeku broda.

Većina trgovačkih brodova kao što su tankeri, brodovi za rasuti teret, brodovi za opći teret i drugi, odnosno brodovi uobičajenih dimenzija, projektiraju se koristeći izravno propisane postupke i pravila određenog klasifikacijskog društva. U slučaju ekstremnog odziva konstrukcije postojeća pravila klasifikacijskih društava ne uključuju izravan hidroelastični proračun. Ukupno projektno opterećenje konstrukcije prema [4] dano je u obliku ekvivalentnih pojednostavljenih slučajeva opterećenja kao kombinacija različitih ekstremnih opterećenja za pretpostavljene uvjete eksploatacije. Iako se način određivanja ekstremnih uvjeta opterećenja djelomično bazira na hidrodinamičkim proračunima, pravila klasifikacijskih društava se i dalje temelje na empirijskim proračunima. Da eventualna čvrstoća konstrukcije ne bi došla u pitanje, klasifikacijska društva uvela su niz faktora sigurnosti koji su uz opsežne iskustvene povratne informacije osigurali zadovoljavajuću sigurnost postojećih brodova [4].

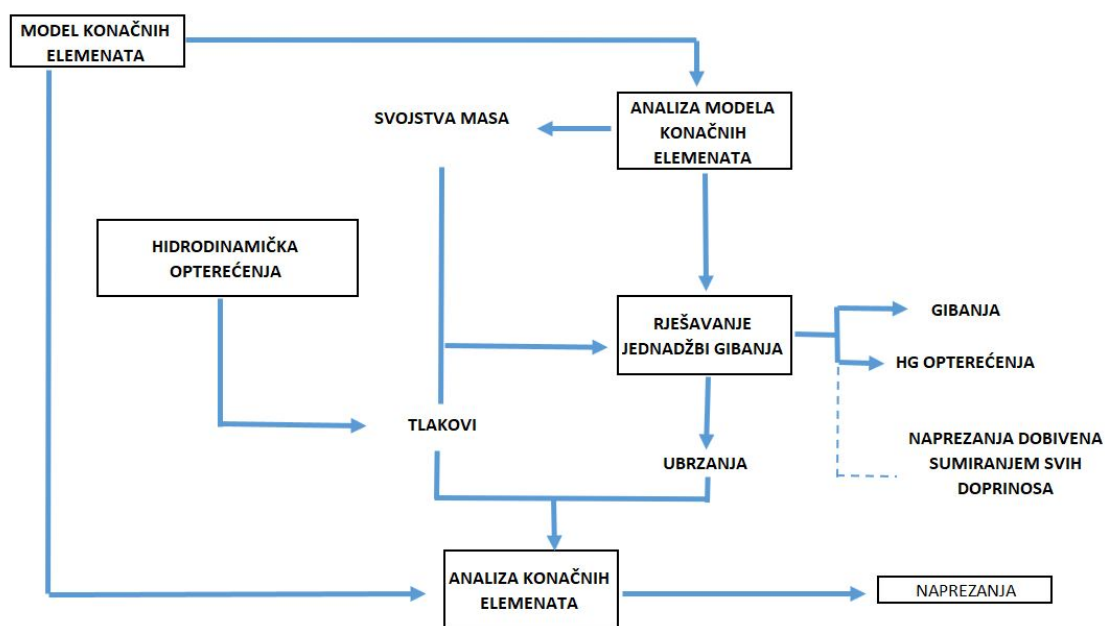
Osiguravanje čvrstoće brodske konstrukcije raznim faktorima sigurnosti, nije prikladno za nove projekte koji znatno odskaču od uobičajenih tipova brodova i njihovog načina eksploatacije.

Kada se govori o zamoru brodske konstrukcije, pravila se služe pristupom sličnim ekvivalentnim opterećenjima koji daju vrlo grube proračune zamora brodske konstrukcije.

Prema [4] u tzv. direktnom proračunskom pristupu analize pouzdanosti brodske konstrukcije, odziv broda bi trebao biti direktno proračunat tijekom cijelog životnog vijeka broda koristeći potpuno spregnuti hidrostrukturni model pri čemu prepoznavanje ekstremnih uvjeta opterećenja i zamora brodske konstrukcije trebaju biti izravno određeni.

Budući da potpuni nelinearni hidrostrukturni proračuni nisu praktični za korištenje zbog potrebe za velikim računalnim i vremenskim resursima kao i upitne točnosti samog proračuna, potrebno je razmotriti neka približna rješenja koristeći se različitim razinama aproksimacije u različitim koracima u cjelokupnoj metodologiji.

Na Slici 4, dana je shema proračuna dinamičke analize.



Slika 4. Shema proračuna dinamičke analize [6]

Usvajanje i razumijevanje novih metodologija u rješavanju problema hidroelastičnosti kao što je sprežanje 3D MKE modela konstrukcije i 3D potencijalnog hidrodinamičkog modela glavna su motivacija za izradu ovog rada. U izradi rada korišten je komercijalni programski paket HOMER ustupljen od klasifikacijskog društva Bureau Veritas, Pariz. 3D model konačnih elemenata brodske konstrukcije generiran je u brodogradilištu *Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.* i također je ustupljen za izradu ovog rada. Diplomski rad koncipiran je kroz sedam poglavlja. Nakon opisa osnovne problematike vezane za hidroelastičnost brodskih i pomorskih konstrukcija u drugom poglavlju opisani su suvremeni pristupi u rješavanju problema hidroelastičnosti s naglaskom na numeričke simulacije. U trećem poglavlju prikazana je primijenjena proračunska metodologija. Četvrto poglavlje vezano je za opis korištene programske podrške, a u petom poglavlju dan je opis analiziranog broda i numeričkih modela. Rezultati proračuna zamornog vijeka za određeni skup konstrukcijskih detalja, uzimajući u obzir utjecaj linearnog pruženja detaljno su prikazani u šestom poglavlju. Rezultati detaljne hidroelastične analize kontejnerskog broda koji je predmet ovog diplomskog rada raspoloživi su u literaturi i to na sve tri *WhiSp* razine, pri čemu valja istaknuti da ovaj diplomski rad obrađuje dodatni skup strukturnih detalja. Također, izvorni doprinos predstavljaju analize konvergencije rezultata, s obzirom na korak susretnog

kuta kao parametar. Naposljetku je dan zaključak diplomskog rada sa smjernicama za daljnja istraživanja.

## 2. SUVREMENI PRISTUPI U ANALIZI HIDROELASTIČNOSTI BRODSKIH I POMORSKIH KONSTRUKCIJA

Imajući u vidu u kakvom se okruženju brodske i pomorske konstrukcije nalaze jasno je da utjecaj fluida koji ih okružuje primarno određuje odzive konstrukcije. Neželjena pojava svakako jesu vibracije nastale uslijed nailaska valova. U drugoj polovici 20. stoljeća istraživanjem tog fenomena došlo se do spoznaje da se spomenuta pojava događa brodovima smanjene krutosti što su tada bili brodovi za prijevoz rasutog tereta [7]. Napredak u istraživanju hidroelastičnosti brodskih i pomorskih konstrukcija dogodio se krajem 20. stoljeća kada su prema [7] objavljeni mnogi znanstveni radovi. U početnim fazama kombinirala se Euler-Bernoullijeva, a zatim i Timošenkova greda s dvodimenzionalnom hidrodinamičkom teorijom dajući jedinstvenu teoriju grednih odsječaka. Značajnija postignuća uslijedila su nekoliko godina kasnije kada je spomenuti korišteni koncept proširen zamjenom metode odsječaka s trodimenzionalnom teorijom potencijalnog strujanja, čime je omogućena primjena na brodske i pomorske konstrukcije proizvoljnog oblika [7].

Danas se mogu provoditi analize i proračuni trodimenzionalnih hidroelastičnih modela kako u frekvencijskoj tako i u vremenskoj domeni. Također provedena su istraživanja kako bi se upotreba hidroelastičnog modela mogla primijeniti za složenije konstrukcije npr. višetupci, platforme, plutajući aerodromi, itd., te za razne kombinacije opterećenja i odziva. Jedan od najbitnijih koraka u hidroelastičnoj analizi, koja se temelji na modalnom principu, je analiza prirodnih vibracija.

Zamor brodskih konstrukcija nastaje postupno nakon dugoročnih promjenjivih, cikličkih naprezanja. Karakterizira ga pojava u fazama, od oku nevidljive mikropukotine do znatnih i opasnih oštećenja koja mogu dovesti u pitanje sigurnost ljudi i gubitak broda.

Imajući u vidu veliku ugrozu sigurnosti radi zamora materijala, napisano je i objavljeno mnogo radova na tu temu, a za cilj im je što bolje istražiti kako zamor materijala utječe na konstrukciju tj. na koji način provesti adekvatnu analizu brodske konstrukcije na zamor [7]. Metode analize zamora su sljedeće:

- korištenjem S-N krivulja,
- princip mehanike loma,

- analizom prototipa.

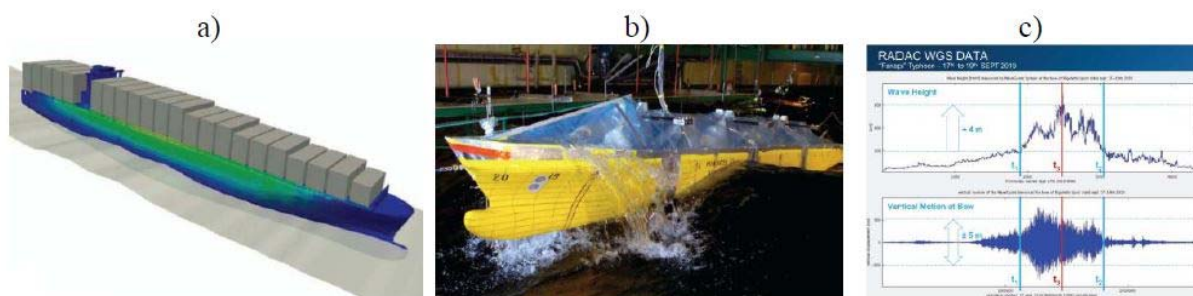
Ovisno o referentnom klasifikacijskom društvu koje odaberemo za analizu zamora, postupak se može bitno razlikovati pa tako može biti brz i jednostavan, dok s druge strane može postati i ne tako praktičan. Zajedničko svim klasifikacijskim društvima su razna pojednostavljenja pri analizi koja će davati zadovoljavajuće rezultate za standardizirane strukturne detalje. Sofisticiraniji način određivanja zamora materijala brodske konstrukcije je spektralna metoda koja se sastoji od četiri koraka [7]:

- određivanje hidrodinamičkog opterećenja,
- strukturna analiza,
- određivanje dugoročne razdiobe naprezanja,
- proračun akumulacije zamornog oštećenja.

Dosadašnja pravila klasifikacijskih društava razvijena su za tipične brodove kojima se duljina ne kreće od 300-400 m. Valja imati na umu da se kraći brodovi obično promatraju kao kruto tijelo, dok se za razliku od njih veliki kontejnerski brodovi ponašaju kao elastično tijelo na valovima. Kod krutog tijela određivanje funkcije distribucije dugoročnog naprezanja lako je aproksimirati pomoću Weibullove dvoparametarske razdiobe. Kod elastičnog broda taj problem nije trivijalan, zato što je teško pronaći jednostavnu funkciju koja bi dobro opisala funkcije distribucije dugoročnog naprezanja, zato jer je bimodalni spektar odziva elastičnog broda složeniji pa je proceduru analize zamora (spektralne analize) potrebno korigirati [7].

S obzirom na sve navedeno, kako bi se dobili točni rezultati analize odziva (utjecaj pruženja i podrhtavanja na zamor) provode se:

- numeričke simulacije,
- modelska ispitivanja,
- mjerenja u naravi.



**Slika 5. Načini provođenja analize; a) numerička simulacija, b) modelska ispitivanja, c) mjerenja u naravi [7]**

## 2.1. Modelska ispitivanja

Utjecaj vibracija na brodsku konstrukciju uslijed djelovanja valova može se procijeniti pomoću modelskih ispitivanja u kojima se modelira i elastičnost broskog trupa. Najčešći način provođenja takvih ispitivanja je izrada segmentnog modela s elastičnom vezom ili modela sa zglobovima. Glavna prednost modela s elastičnom vezom je u tome što elastična veza osigurava kontinuiranu raspodjelu krutosti, a pomaci se mogu lako mjeriti pomoću tenzometarskih traka za mjerenje naprezanja koje su zalijepljene na gredu. Model sa zglobovima sastoji se od segmenata povezanih rotirajućim oprugama. Iz gore navedenog jasno je da se modeli za ispitivanja moraju napraviti s prilagodljivom krutosti kao što primjerice model prikazan u [8]. Na Slici 6, prikazan je segmentni model sa prilagodljivom krutošću.



**Slika 6. Segmentni model [8]**

Broj pozicija na kojima se može mjeriti sila kod segmentnog modela s rotirajućim oprugama je ograničen što mu je nedostatak. Potpuno fleksibilni modeli su zapravo puno bolji za opis stvarnog stanja. Unatoč tome ta metoda ima niz nedostataka sa samom tehnikom modeliranja. Najvažniji nedostaci su cijena i poteškoće vezane uz izradu takvih modela. Temeljit pregled rane upotrebe potpuno elastičnih modela prema [9] iznesen je 2003. godine. Od tada se značajniji razvoj postigao u području brzog razvijanja prototipova. Da bi se uvjerali da brza izrada prototipova može biti prikladan način izrade potpuno fleksibilnih modela, prema [10], istraživalo se korištenje tehnologije 3D printanja za izradu preciznih fleksibilnih modela. Razmatrano je nekoliko metoda 3D printanja i sve metode imale su nedostatak povezan s veličinom printera. S obzirom na to, predložen je modularni pristup za izgradnju brodskih modela. Osim što je dobivena veza između veličine modela i broja modula analizirani su i zahtjevi za globalno i lokalno skaliranje. Iako za potpuno elastične modele još uvijek nije potpuno istražen utjecaj prigušenja, zaključak mnogih istraživanja je da će 3D printanje omogućiti potpuno fleksibilnim modelima da budu dostupni u skorijoj budućnosti [8].

Neka poznatija modelska ispitivanja napravljena na segmentnim modelima su prema [8]:

- kontejnerski brod kapaciteta 10000 TEU duljine 321 metar,
- brod za prijevoz rudače duljine 425 metara,
- brod za prijevoz rudače duljine 350 metara,
- katamaran duljine 112 metara.

Kontejnerski brod duljine 321 m, bio je ispitan kao dio združenog industrijskog projekta *WILS* (eng. *Wave Induced Loads on Ships*) u *KRISO-u* (eng. *Korea Research Institute of Ships and Offshore engineering*). Model je bio napravljen od šest segmenata povezanih čeličnim (krutim) vezama. Krute veze bile su opremljene s više od 100 tenzometarskih traka kako bi se izmjerio konstrukcijski odziv. Izboj pramca i udaranje krme o valove mjereni su odgovarajućom raspodjelom ćelija za opterećenje na pramčanom i krmenom dijelu. Model je testiran na pravilnim i nepravilnim valovima i s promjenom brzine i susretnog kuta. Prema [11], korišteni su podaci iz navedenih mjerenja kako bi odredili vezu između udaranja pramca o valove i podrhtavanja. Ti rezultati ispitivanja, između ostaloga, potvrdili su da je udarna sila proporcionalna kvadratu udarne brzine. Također, opaženo je da je u uvjetima nailaska pravilnih valova i brže plovidbe, vertikalni moment savijanja, zbog globalnih odziva savijanja, proporcionalan sili udaranja pramca o valove. U uvjetima nepravilnih valova znatno

je teže izvesti zaključke zbog poteškoća u razlikovanju pruženja i podrhtavanja. Na temelju tih podataka, prema [8], potvrđeno je postojanje harmonika višeg reda za vertikalno savijanje i torzijske vibracije. Prema [12] isti podaci su korišteni za istraživanje pramčanih opterećenja uslijed udaranja o valove. Otkriveno je da nisu samo vertikalna gibanja bitna kod udaranja pramca o valove nego i trenutna uzdužna brzina koja određuje udarnu silu. To objašnjava visoku učestalost udarnih opterećenja zbog relativnih horizontalnih brzina uzrokovanih strmim valom i brzinom napredovanja broda [8].

Brod za prijevoz rudače duljine 425 metara ispitan je u bazenu za ispitivanja na *Harbin Engineering University*. Model se sastojao od devet segmenata koji su bili povezani s elastičnom vezom. Elastična veza izrađena je od četiri različite grede. Istraživale su se tri elastične veze s različitom krutosti. Model je prema [13] ispitan u uvjetima pravilnih valova. Periodi pravilnih valova odabrani su tako da uzrokuju linearno pruženje drugog i trećeg reda. Spomenuta istraživanja potvrdila su da se krutost kao i prirodna frekvencija svojnih vibracija smanjuje te da u tom slučaju utjecaj pruženja postaje značajniji.

U [14] je opisano istraživanje broda za prijevoz rudače duljine 350 metara. Model se sastojao od šest segmenata spojenih vezom koja je sustav tronošca s rešetkastom konstrukcijom, a na svakom spoju umetnuta je posebna konstrukcijska veza spojena tako da krutost može biti prilagodljiva dopuštajući fino podešavanje prirodnih frekvencija modela. Model je ispitan na nepravilnim valovima. Izmjereni odziv izražen je kvadratnim Volterrinim redom. Iz ove studije pokazano je da je kvadratni dio globalnih odziva savijanja usporediv s linearnim dijelom i da kvadratni dio globalnih odziva ima tendenciju rasta s porastom valne visine.

Prema [15] ispitan je model katamarana duljine 112 metara u pravilnim valnim nailascima u bazenu za ispitivanje na *Australian Maritime College, University of Tasmania*. Model je napravljen od šest segmenata i to od srednje sekcije, dvije krmene sekcije, dva pramčana polu otvorena segmenta i odvojenog krmenog segmenta. Šuplje aluminijske grede bile su kruto vezane za segmente. Tijekom modelskog ispitivanja izmjerena je udarna sila ekvivalentna sili od 2150 tona za brod duljine 112 metara. U tom istraživanju udio visoko frekventnih odziva nije razmatran. Prema [16], testiran je isti model, ali s nepravilnim valovima u pramac, pri čemu je pokazano da su testna udarna opterećenja iznosila do 132% težine trupa. Udarne opterećenja imala su sličan vremenski period kao i najniži oblik vibriranja svojnih vibracija.



To pokazuje da je nužno imati model u mjerilu kako bi hidroelastičnost bila korektno prikazana.

Prema [17] korišteni su podaci modelskih ispitivanja brodova kapaciteta 4400, 8600 i 13000 TEU za ekstrapolaciju relevantnih trajanja različitih stanja mora. Glavno pitanje bilo je koje od izmjerenih stanja mora odgovara kontejnerskom brodu kada je uključeno podrhtavanje, a zaključeno je da se najveći momenti savijanja ne događaju samo na najtežim stanjima mora. Radi više vremena provedenog u umjerenim stanjima mora, najveća valna visina se odabire upravo za ta stanja mora. Uspoređivajući rezultate ekstrapolacije za ta tri broda, pokazano je da veličina broda nije ključan faktor u pojavi podrhtavanja, ali izboj kuta pramca jest. Treba spomenuti da su prisutne i određene nepouzdanosti u ekstrapolacijskim metodama. Prema [18] proučavane su četiri različite metode ekstrapolacije. Razlike između ekstrapoliranih vrijednosti bile su značajne te je potrebno pažljivo odabrati ekstrapolacijsku metodu. Prema [19] metodu *ACER*-a (eng. *Average Conditional Exceedance Rate*) razvili su Naess i Gaidai 2009. godine i ona je prihvaćena kao najpreciznija. Rezultate ispitivanja modela kontejnerskog broda kapaciteta 13000 TEU koristili su prema [20] Zhu i Moan 2015. godine kako bi istražili utjecaj kuta nailaska valova. Pokazano je da se za brodove duljine do 200 metara najveći vertikalni moment savijanja uobičajeno pojavljuje kada je kuta nailaska vala  $0^\circ$  ili  $180^\circ$ , odnosno za valove u pramac ili krmu. Za brodove duljine 300 metara i više, vertikalni moment savijanja s kosim nailaskom valova postaje značajan. Važna preporuka za buduća modelska ispitivanja kontejnerskih brodova je da prigušenje mora biti uzeto u obzir na odgovarajući način, jer. prijašnja ispitivanja pokazuju da je prigušenje značajno manje nego u stvarnosti [8].

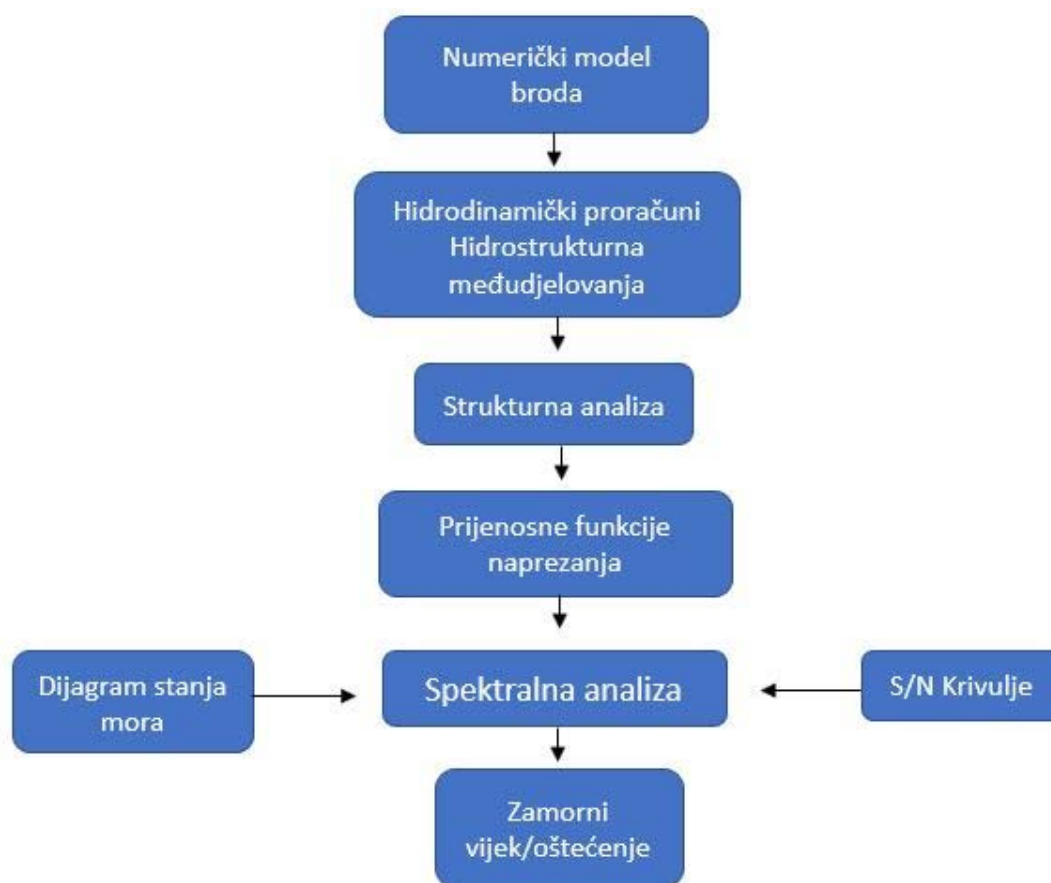
## 2.2. Numeričke simulacije

Hidrostrukturalna međudjelovanja imaju svoje različite oblike. Primjerice dio hidrodinamičkog opterećenja je uvijek dinamički, međutim konstrukcija može ili ne mora biti dinamički pobuđena. Iz tog razloga definiramo kvazistatički odziv kao odziv u kojemu nisu u obzir uzete vibracije konstrukcije trupa. Za razliku od kvazistatičkog odziva, u dinamički odziv (hidroelastični odziv) uključene su vibracije konstrukcije broda. Usporede li se ta dva modela, jasno je da je hidroelastični model znatno složeniji zato što hidrodinamička opterećenja i strukturni odzivi ovise jedno o drugom u svakom trenutku. To vrijedi za svaku vrstu hidrodinamičkog opterećenja koje se razmatra. Na Slici 7, prikazan je dijagram toka

numeričkih simulacija kod određivanja spektralne analize zamore [21], a u Tablici 1, dana je razlika u opisu hidrodinamičkog opterećenja (linearno, blago nelinearno, impulzivno nelinearno) i u vrsti odziva konstrukcije (kvazistatički i dinamički).

**Tablica 1. . Različiti oblici hidrostrukturnih interakcija [21]**

H	Linearni	Blago nelinearni	Impulzivno nelinearni
S			
Kvazistatički	X	X	X
Dinamički	X	X	X



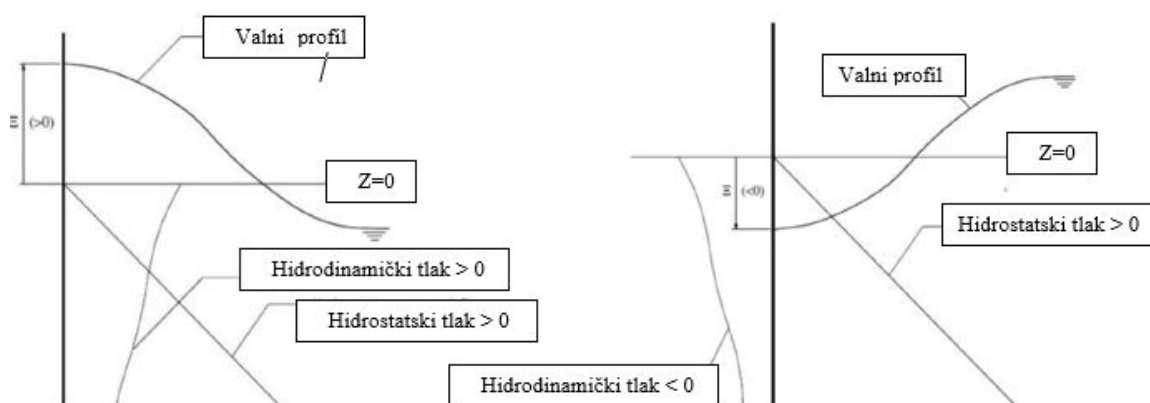
**Slika 7. Dijagram toka spektralne analize zamora**

### 2.2.1. Hidrodinamički model

Kako bi se što lakše opisao i shvatio hidroelastični model potrebno je objasniti različite tipove hidrodinamičkih modela opterećenja. Linearni hidrodinamički model je model u kojem su svi rubni uvjeti linearizirani, a hidrodinamički problem rubne vrijednosti (eng. *Boundary Value Problem – BVP*) riješen za određeno područje. Uobičajeni postupak rješavanja provodi se u frekvencijskoj domeni koja omogućuje relativno brze proračune. Blago nelinearni hidrodinamički model koji se koristi je tzv. *Froude-Krylov* model. Temelji se na principu korekcije hidrodinamičkog tlaka u blizini vodne linije. U skladu s linearnom teorijom za hidrodinamički model se podrazumijeva samo dio do vodne linije tj. do mjesta gdje je  $z = 0$ , zbog toga se lokalno može pojaviti negativni hidrodinamički tlak [21].

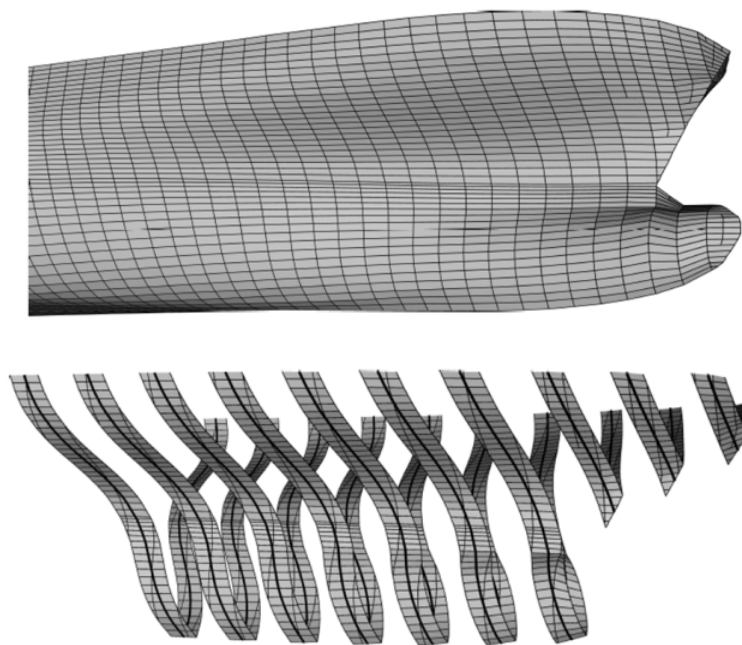
Postoji više različitih *Froude-Krylov*jevih modela, a najjednostavniji je lako shvatljiv sam po sebi jer se sastoji od dodavanja hidrostatičkog tlaka ispod valnog vrha, a iznad valnog vrha ukupni tlak jednak je nuli. Korištenje *Froude-Krylov*jevih modela smanjiti će problem određivanja oplakane površine broda [21]. Na Slici 8, dan je prikaz korekcije tlaka u odnosu na vodnu liniju [21].

Impulzivna nelinearna hidrodinamička opterećenja su opterećenja uzrokovana različitim vrstama visoko nelinearnih lokalnih fenomena kao što su udaranje pramca o valove, naplavljivanje, podvodne eksplozije i slično. Takva opterećenja su obično prolaznog karaktera i kratkog trajanja za razliku od uobičajenih valnih opterećenja i upravo je to razlog zašto je nužno provesti hidroelastičnu analizu.



Slika 8. Froude-Krylovljeva korekcija tlaka za valni brijeg i dol [21]

Udaranje pramca o valove razmatra se u kontekstu pojave podrhtavanja. Generiranje modela kojim bi se mogao provesti hidrodinamički proračun udaranja pramca o valove je teško izvedivo zato što je hidrodinamički problem podrhtavanja iznimno složen i ne postoji potpuno zadovoljavajući način provođenja numeričke simulacije. Metoda koja se standardno koristi zove se vrpčasta metoda. Vrpčama se najčešće prikazuju krmeni i pramčani pikovi broda, a za svaku vrpču se primjenjuje 2D model udaranja pramca o valove tzv. poopćeni *Wagnerov model*, vidi Sliku 9.



Slika 9. Vrpčasta diskretizacija pramca za proračun udaranja o valove [4]

### 2.2.2. Hidrostatički model

U hidroelastičnoj analizi uključena je uobičajena krutost konstrukcije i povratna hidrostatička krutost. Određivanje povratne krutosti je poprilično zahtjevan problem te ima dvije osnovne formulacije, trajna krutost s raspodijeljenom/sjedinjenom te ukupnom masom. Formulacija s raspodijeljenom masom djeluje s geometrijskom krutosti temeljenom na naprezanju broda na mirnom moru, kao rezultat raspodjele težine broda i uzgona. Zbog postojanja numeričkih nestabilnosti za potpunu povratnu krutost za praktično korištenje preferira se trajna krutost s raspodijeljenim masama. Prijenosna funkcija određena je

integracijom glavnih parametara krutosti i interpoliranih prirodnih oblika vibriranja s funkcijom oblika preko područja strukturnih konačnih suhih i mokrih elemenata [4].

### 2.2.3. Hidroelastični model

Kada su zadovoljeni prethodni uvjeti, tj. definirani prethodni modeli: hidrodinamički i hidrostatički model, uz pretpostavku da je definiran i strukturni model, može se konstituirati hidroelastični model [7].

Hidroelastični model temelji se na tzv. modalnom pristupu što znači da globalni dinamički odziv može biti prikazan kao suma konačnog broja globalnih oblika vibriranja [21,22]. U takvom pristupu ukupni pomaci na brodu prikazani su kao niz modalnih pomaka [21]:

$$H(x,t) = \sum_{i=1}^N \xi_i(t) h^i(x) \quad (1)$$

gdje je:

- $H(x,t)$  – ukupni pomak pojedine točke na tijelu
- $h^i(x)$  – modalni pomak
- $\xi_i(t)$  – modalna amplituda

Oblici vibriranja se uobičajeno uzimaju tako da budu strukturni prirodni oblici vibriranja te se postupak provodi kao i kod analize krutih tijela osim što se poveća broj oblika vibriranja sa šest na neki veći broj određenih elastičnih oblika vibriranja. Takav modalni pristup podrazumijeva definiranje radijacijske komponente potencijala sa sljedećim rubnim uvjetima tijela [10]:

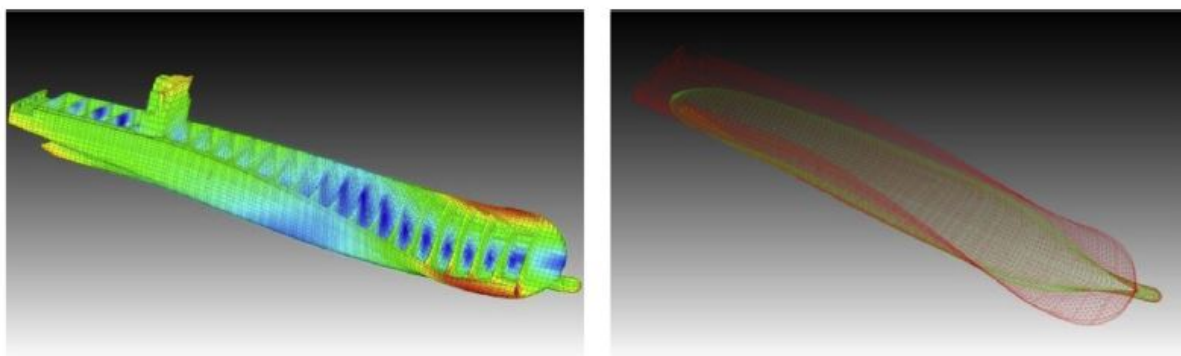
$$\frac{\partial \rho_{Rj}}{\partial n} = h^j n \quad (2)$$

Nakon rješavanja različitih problema granične vrijednosti za potencijale, odgovarajuće sile su izračunate i jednačba gibanja glasi:

$$\left\{ -\omega^2 ([m] + [A]) - i\omega([B] + [b]) + ([k] + [C]) \right\} \{ \xi \} = \{ F^{DI} \} \quad (3)$$

gdje je su  $[m]$  modalna matrica mase konstrukcije,  $[b]$  modalna matrica prigušenja konstrukcije,  $[k]$  modalna matrica krutosti,  $[A]$  modalna pridružena masa,  $[B]$  modalno hidrodinamičko prigušenje,  $[C]$  povratna krutost.  $\{\xi\}$  su modalne amplitude a  $\{F^{DI}\}$  je modalna hidrodinamička uzbuda dok je  $\omega$  susretna frekvencija [7,21].

Suprotno od kvazistatičkog pristupa, gdje se hidrodinamički tlak mora prenijeti s hidrodinamičke mreže na strukturnu mrežu konačnih elemenata, u ovom pristupu radijacijski rubni uvjeti podrazumijevaju prijenos strukturnih čvornih pomaka sa strukturne mreže konačnih elemenata na hidrodinamičku mrežu. Postupak prenošenja zahtjeva relativno složenu interpolaciju kako bi prijenos na hidrodinamičku mrežu bio valjan, pri čemu je tipičan rezultat tog prijenosa dan na Slici 10 [21].



**Slika 10. Rezultat prijenosa pomaka sa strukturne na hidrodinamičku mrežu [21]**

Rješavanje jednadžbe (3) dat će modalne amplitude što znači da je hidroelastični problem u principu riješen. Posebno treba paziti da se pravilno odvoji dinamički od kvazistatičkog dijela odziva konstrukcije. Zbog činjenice da se koristi ograničen broj oblika vibriranja, ukupni strukturni odziv ne može se dobiti jednostavnim zbrajanjem različitih modalnih udjela. To znači da svi oblici vibriranja koji nisu uzeti u obzir kod proračuna hidroelastičnog modela moraju biti uzeti u obzir za kvazistatički proračun. U numeričkom modelu koji je implementiran u spomenutom numeričkom alatu HOMER, razdvajanje kvazistatičkog od dinamičkog dijela odziva provedeno je tako da se jednadžba (3) raspiše u slijedećem obliku:

$$\left( \begin{bmatrix} [RR] & [RE] \\ [ER] & [EE] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [k] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \xi^R \\ \xi^E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^R \\ F^E \end{Bmatrix} \quad (4)$$

gdje R označava krute dijelove tijela, E stoji za elastične a k za modalnu krutost konstrukcije. Ukupne amplitude odziva podijeljene su na kvazistatički dio (indeks 0) i dinamički dio (indeks d) kako slijedi:

$$\begin{aligned} [RR]\{\xi_0^R\} &= \{F^R\} \\ [k]\{\xi_0^E\} &= \{F^E\} - [ER]\{\xi_0^R\} \end{aligned} \quad (5)$$

Kvazistatički dio odziva je definiran prema slijedećem izrazu:

$$\begin{aligned} [RR]\{\xi_0^R\} &= \{F^R\} \\ [k]\{\xi_0^E\} &= \{F^E\} - [ER]\{\xi_0^R\} \end{aligned} \quad (6)$$

Nakon uvrštavanja jednadžbi (5) i (6) u (4) sustav linearnih jednadžbi za dinamički dio glasi:

$$\left( \begin{bmatrix} [RR] & [RE] \\ [ER] & [EE] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [k] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \xi_d^R \\ \xi_d^E \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} [RE]\xi_0^R \\ [EE]\xi_0^E \end{Bmatrix} \quad (7)$$

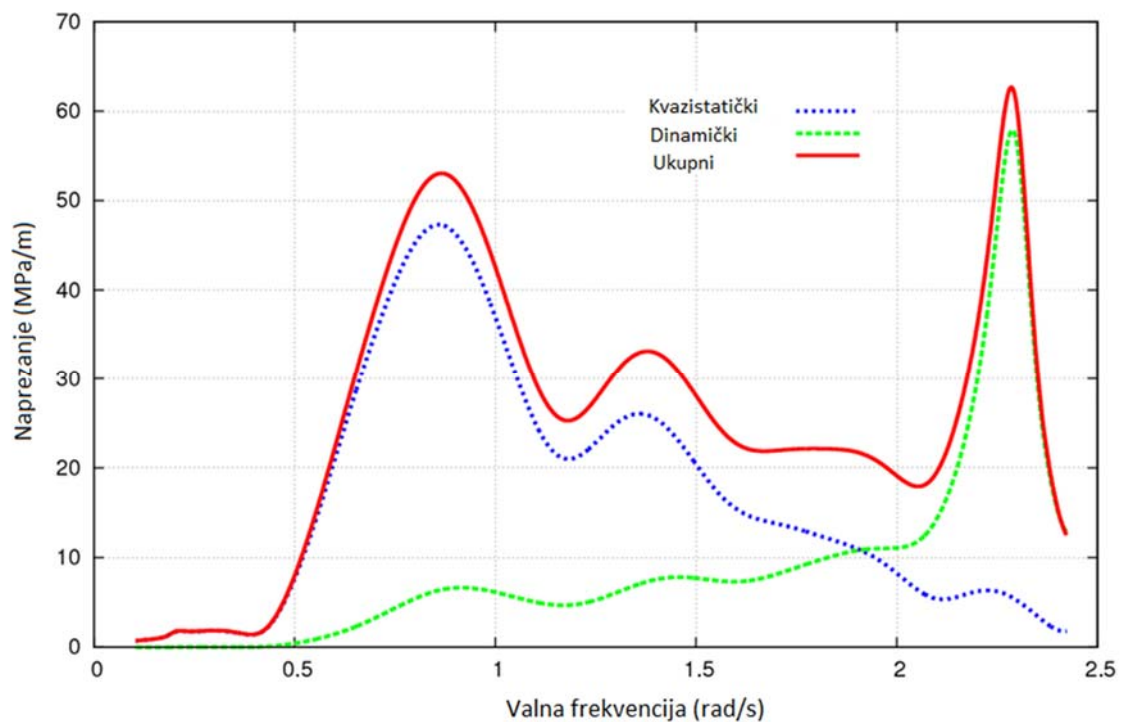
Gornji izraz je ključan dio postupka modalnog pristupa i omogućava potpunu odgovarajući proračun ukupnog strukturnog naprezanja. Kvazistatički dio naprezanja izračuna se direktnim pristupom, a ne modalnim tako da su svi strukturni oblici vibriranja uključeni u kvazistatički dio naprezanja. Tada će viši oblici vibriranja koji neće biti pobuđeni udaranjem pramca o valove, također biti uzeti u obzir. Kraj postupka je jednostavan, dinamički udio se zbroji s kvazistatičkim dijelom i dobije se ukupno naprezanje. Takav pristup u potpunosti otklanja problem konvergencije zbog nepotpunih nizova oblika vibriranja koji se koriste. Istodobno omogućeno je vrlo precizno odvajanje uobičajenog kvazistatičkog dijela od hidroelastičnog [21].

Nakon što je linearni hidroelastični model riješen u frekvencijskoj domeni, slično kao i kod dinamike krutih tijela, model u vremenskoj domeni dobiva se na već dobro poznati način i u svakom vremenskom koraku uzbudi se doda drugačija nelinearnost. To nam omogućava uzimanje u obzir opterećenja udaranja pramca o valove koji je neophodan za provedbu *WhiSp* simulacija. S obzirom na navedeno konačni izraz glasi:

$$([m] + [A^\infty])\{\ddot{\xi}(t)\} + ([k] + [C])\{\xi(t)\} + [b]\{\dot{\xi}(t)\} \quad (8)$$

$$+\int_0^t [K(t-\tau)] \{\dot{\xi}(\tau)\} d\tau = \{F(t)\} + \{Q(t)\},$$

gdje su  $[m]$  – modalna matrica masa,  $[A^\infty]$  – modalna matrica beskonačne frekvencije,  $[k]$  – matrica krutosti konstrukcije,  $[C]$  – hidrostatska matrica povratne krutosti,  $[b]$  – matrica strukturnog prigušenja,  $[K(t-\tau)]$  – matrica impulsnog odziva,  $\{F(t)\}$  – linearni vektor uzbudne sile,  $\{Q(t)\}$  – nelinearni vektor uzbudne sile,  $\{\xi(t)\}$  – vektor pomaka odnosno deformacija [21]. Na Slici 11, prikazan je karakterističan izgled prijenosne funkcije odziva.



Slika 11. Karakterističan izgled prijenosne funkcije odziva [4]



### 2.3. Ispitivanja u naravi

Svrha ispitivanja u naravi je prikazati utjecaj vibracija brodske konstrukcije izazvanih valovima na zamor i ekstremni odziv. Dalje u tekstu prikazan je utjecaj različitih parametara koji imaju veliku ulogu u odzivu brodske konstrukcije kao što su duljina broda, brzina plovidbe, stanje mora, područje plovidbe itd. [23]. Brodovi za koje su u posljednjih nekoliko godina provedena ispitivanja u naravi su kontejnerski brodovi kapaciteta: 2800, 4400, 4440, 4600, 8400, 8600, 9400, 14000 TEU, te brod za prijevoz ukapljenog plina i Ro-Lo brod.

Analize utjecaja vibracija brodskih konstrukcija pobuđenih valovima na zamorno oštećenje palube na sredini broda počele su biti dio standardnog projektnog postupka. U nizu izvještaja obrađenih u [24] dani su rezultati ispitivanja sedam kontejnerskih brodova kapaciteta od 2800 do 14000 TEU. Utjecaj vibracija u procjeni ukupnog zamornog oštećenja u tim ispitivanjima kretao se od 26% do 57% s tendencijom rasta za veće brodove. Prema [25] u istraživanju 2015. godine izneseni su rezultati utjecaja vibracija na zamorno oštećenje u rasponu od 36% do 42% za brod kapaciteta 8400 TEU za plovidbu širom svijeta i raspon od 56% do 61% za brod kapaciteta 8600 TEU za područje plovidbe od Azije do Europe. Nadalje, prema [26] za isti brod utvrđeno je da su pramac i krma značajno izloženi zamornim oštećenjima te su Storhaug i Kahl primijetili da znatan udio u zamornom oštećenju nastaje pri različitim susretnim kutovima. Ta činjenica potvrđena je i na ispitivanju broda za prijevoz ukapljenog plina. Prema [27] u izvješću iz 2015. godine, pokazan je udio vibracija u ukupnom zamornom oštećenju u iznosu od 50% na brodu kapaciteta 14000 TEU za područje plovidbe od Azije do Europe. Za brod kapaciteta 4600 TEU i područje plovidbe širom svijeta, prema [27] iznesen je podatak o utjecaju na ukupno zamorno oštećenje od 35%. Prema [28] objavljeni su podaci o manjim oštećenjima na području krme odnosno pramca i to u iznosu od 26% na 0,35L, te 20% na 0,75L. Ta činjenica sugerira da je oštećenje nastalo vibracijama brodske konstrukcije veće na mjestima gdje je naprezanje uslijed savijanja veće. U [24] pokazano je da rezultati modelskih ispitivanja kontejnerskih brodova u pravilnim valnim nailascima (valovi bez promjene kuta nailaska) sugeriraju konzervativne procjene s ispitivanjima u naravi. U svim gore navedenim slučajevima koristila se metoda brojanja ciklusa i Palmgren-Minerovo pravilo. Izneseni rezultati ispitivanja zamora temelje se na mjerenju niza vremenskih perioda podrhtavanja. Potvrđeno je da je udio vibracija dobro prikazati u kombinaciji sa metodom brojanja ciklusa i Palmgren-Minerovim pravilom. Utjecaj vibracijskog oštećenja nastaje zbog nisko frekventnih opterećenja dok ostale vibracijske

pojave imaju neznatne udjele u vibracijskim oštećenjima. Ta spoznaja sugerira da ekvivalentno niskofrekventno valno opterećenje treba biti uključeno u projektu osnivanja konstrukcije broda, odnosno koristiti će se u strukturnim proračunima konstrukcije. Prema [27,28] pokazano je da najveći dio zamornog oštećenja proizlazi od niskofrekventnih dijelova spektra naprezanja, unatoč činjenici da je razlika između spektra sa i bez vibracija veća kada je veća razina naprezanja. Ukupno zamorno oštećenje na brodu za prijevoz ukapljenog plina najčešće dolazi od pravilnog nailaska valova sa značajnom valnom visinom od 5 metara [8].

Prema [25,28], u istraživanjima objavljenim 2015. i 2016. godine, razmatran je standardni sustav praćenja opterećenja konstrukcije s preporukom da postotak zamora bude trenutno prikazan na komadnoj ploči radi lakšeg razumijevanja količine zamora. Postotak zamora je definiran kao omjer između izmjerene zamorne oštećenja i ukupnog zamornog oštećenja za taj konstrukcijski detalj u određenom vremenskom intervalu, najčešće taj interval iznosi 30 minuta. Primjerice ako je postotak zamora u jednom danu 90, to znači da je potrošeno tri mjeseca zamornog vijeka konstrukcijskog detalja. Stoga promatranje opterećenja konstrukcije (eng. *hull monitoring*) daje mnogo bolji uvid u konstrukcijska opterećenja od ispitivanja u naravi [8].

Udio podrhtavanja na ekstremna valna opterećenja u sredini broda (savijanje) također je dio standardnih ispitivanja koja se provode na ispitivanjima u naravi. U [8] objavljeni su rezultati o utjecaju podrhtavanja od 48% do 59% u povećanju naprezanja u pregibu za kontejnerski brod kapaciteta 8600 TEU i utjecaju od 25% za kontejnerski brod kapaciteta 8400 TEU s manjim kutom izboja pramca. Prikazano je da se razina pregiba uslijed podrhtavanja povećala za 50% na krmenom dijelu broda što odgovara poziciji na kojoj se brod *MSC Napoli* slomio. Prema [26] izmjereno je iskorištenje nosivosti konstrukcije u iznosu od 45% u pregibu i 76% u progibu na brodu kapaciteta 14000 TEU za vrijeme kratkog razdoblja ispitivanja s najvećom značajnom valnom visinom od 6,5 metara. Zaključak ispitivanja 2014. u kojima je proučavano nekoliko kontejnerskih brodova kapaciteta 4400, 8600, 9200 i 14000 TEU bio je sljedeći: podrhtavanje može povećati valni moment savijanja za 100% ili više, moment savijanja u pregibu može biti jednak kao i moment savijanja u progibu i dominantni oblik vibriranja je drugi vertikalni oblik savijanja kada valovi nailaze bez kuta nailaska. Prema [28] prikazano je da posada na brodu za prijevoz ukapljenog plina sa sustavom praćenja opterećenja konstrukcije uspjela zadržati najveći valni moment savijanja s utjecajem

podrhtavanja ispod 80% od propisane vrijednosti, osim u trajanju od pola sata na razdoblje od pet godina u kojima je taj moment dostigao 100% propisane vrijednosti [8].

Odziv uvijanja na kontejnerskim brodovima označen je kao važan problem u cjelokupnom projektnom zadatku osnivanja brodske konstrukcije. To je prvenstveno rezultat činjenice da najniži prirodni oblici vibriranja takvih brodova odgovaraju odzivu uvijanja, te uvijanja spregnutog sa horizontalnim savijanjem. Prema [25] potvrđen je porast od oko 5% u vrijednosti maksimalnog torzijskog odziva uslijed torzijskih vibracija mjerenih na jednoj od paluba na dva kontejnerska broda kapaciteta 8400 i 8600 TEU. Uobičajeni udio vibracijskog oštećenja na brodovima je od 15% do 16%, a za spomenuta dva kontejnerska broda bio je 52% – 55% te su torzijske vibracije po prvi put označene kao bitne za analiziranje i o njima se mora voditi računa. Udio zamora od vertikalnog i horizontalnog savijanja te torzije proučavao se korištenjem MKE modela za jedno stanje mora uz korištenje linearne regresijske analize za dobivanje veze između valnog opterećenja i naprezanja. Pokazano je da visokofrekventno vitoperenje i horizontalno savijanje čine između 10% i 15% vibracijskog oštećenja na području palube. Za konstrukcijske detalje s unutarnje strane oplata pokazalo se da uslijed vitoperenja u kombinaciji s horizontalnim savijanjem vibracijsko oštećenje raste do 50% [8].

Prigušenje utječe na razinu vibracija za zamor i ekstremno opterećenje. Analiziranjem brodova kapaciteta 8400 i 8600 TEU, prema [25] zaključeno je da je utjecaj torzijskih vibracija na zamor puno značajniji na brodu od 8400 TEU koji ima kritično prigušenje od 5%, nego na brodu kapaciteta 8600 TEU koji ima kritično prigušenje 10%. Procijenjeno je da bi prigušenje za torzijske vibracije velikih kontejnerskih brodova trebalo biti 5,3% od kritičnog prigušenja za frekvenciju od 0,28 Hz. Uspoređeno je šest metoda procjene prigušenja. Te metode koristile su vremenske periode uglavnom prikupljene od odobrenih sustava praćenja opterećenja konstrukcije sa 21 broda kao što su kontejnerski brodovi, tankeri, brodovi za rasuti teret, brodovi za prijevoz ukapljenog plina. Za drugi vertikalni oblik vibriranja, kontejnerski brodovi imali su najveće prigušenje s prosječnim iznosom od 1,7%. Primjerice, za tankere, prosječni iznos prigušenja bio je procijenjen na 0,7%. Iznosi tih prigušenja bili su predloženi kao ciljne vrijednosti za provođenje numeričke analize. Također, primijetilo se da nije bilo značajnih utjecaja prigušenja s obzirom na veličinu broda i brzinu plovidbe. Unatoč tome, nesigurnost tih parametara bila je značajna. Nadalje, procjenjivano je prigušenje za dva vertikalna oblika vibriranja na 210 metara dugom Ro-Lo brodu. Prigušenje se kretalo od

0,48% do 1,62% unutar tri različita operativna stanja (brzina plovidbe od 0,10 i 18 čvorova) [8].

Nažalost postoje primjeri gdje se vibracije uzrokovane valovima ne procjenjuju ili nisu uključene u analizu unatoč tome što su mjerenja napravljena. Prema [29] korištena su ispitivanja u naravi kako bi se evaluirali rezultati spektralne analize zamora za ratni brod. U [30] uspoređeni su rezultati mjerenja i projektni spektar naprezanja za zamornu analizu patrolnog broda duljine 56 metara. U zamornoj analizi koristila se metoda brojanja ciklusa i drugi vertikalni oblik vibriranja na 5 Hz. Zaključak je da je spektar naprezanja bio znatno ispod prihvatljivih vrijednosti, svega do 45% vrijednosti izračunate po pravilima, za vrijeme ispitivanja u trajanju od 4500 sati [8].

Statistička razmatranja izmjerenih podataka se ne provode često, ali unatoč tome prema [31] provedena su razmatranja mjerenja na brodu kapaciteta 2800 TEU koji je plovio Sjevernim Atlantičkim. S dvojakom funkcijom *ACER*-a proučavala se mogućnost zajedničke vjerojatnosti naprezanja na palubi u sredini broda i na krmenom dijelu. Prema [32] izneseno je predviđanje ekstremnih vrijednosti koristeći se *POT*-om (eng. *Peak Over Threshold*) i individualnom distribucijom maksimuma u kombinaciji s Gumbelovom ekstremnom distribucijom. *POT* metoda smatrana je najkorisnijom i imala je najbliža podudaranja s mjerenjima na brodu kapaciteta 9400 TEU. Prema [33] izvedena je analiza ekstremnih vrijednosti na tri kontejnerska broda kapaciteta 8600, 9400, i 14000 TEU na način da je usvojena *POT* metoda s Gumbelovom ekstremnom distribucijom vrijednosti. Također, pomoću *ACER*-ove funkcije, proučavan je i utjecaj grupiranja. Utjecaj grupiranja potvrđen je na brodu kapaciteta 9400 TEU. Pronađene su vrlo jednostavne teorijske formule koje su pogodne za ograničenje razine prekoračenja, ali one nisu uspjele obuhvatiti posljedice grupiranja. Zaključeno je da za statističku ekstrapolaciju ne postoji savršena metoda koja će uklopiti sve podatke dobivenih iz ispitivanja u naravi, ali *POT* metoda smatra se nužnom kao polazna točka, dok ekstremna raspodjela vrijednosti tek treba biti potvrđena kao korisna [34].

### 3. OPIS PRORAČUNSKE METODOLOGIJE

Specifična karakteristika velikih kontejnerskih brodova u usporedbi s drugim brodovima je ta što će oni vrlo vjerojatno doživjeti pojavu hidroelastičnog odziva konstrukcije uslijed pruženja i podrhtavanja [4,35]. Zbog toga su neka klasifikacijska društva razvila smjernice koje uključuju utjecaj hidroelastičnosti u fazi projektiranja broda. Nadalje, upravo za tu svrhu dostupno je nekoliko hidrostrukturnih alata koji se u principu oslanjaju na iste teorijske pretpostavke, ali koriste različite numeričke metode. Takvi alati se uglavnom temelje na primjeni spreznja 3D MKE modela konstrukcije i 3D potencijalnog hidrodinamičkog modela. Razvoj i dostupnost hidrostrukturnih alata omogućuje provođenje istraživanja utjecaja pruženja i podrhtavanja broda. Kompletan analiza hidroelastičnosti se provodi na *WhiSp1*, 2 i 3 razini [35].

U ovom poglavlju detaljnije je obrađena *WhiSp1* razina, budući da je predmet zadatka ovog diplomskog rada, dok su za razine *WhiSp2* i *WhiSp3* prikazani osnovni proračunski principi.

Cilj *WhiSp* metodologije je uzeti u obzir utjecaj hidroelastičnosti brodske konstrukcije uslijed zamora i ekstremnih opterećenja. Detalji *WhiSp* metodologije opisani su u smjernici *Bureau Veritas, Pariz NR583* [36]. Među svim ostalim tehničkim pitanjima [36] uključuje i:

- preporuke za analizu pruženja i podrhtavanja,
- metodologiju za dugoročnu analizu različitih fizikalnih veličina,
- opis različitih razina *WhiSp* metodologije.

Područje primjene *WhiSp* metodologije sažeto je u Tablici 2.

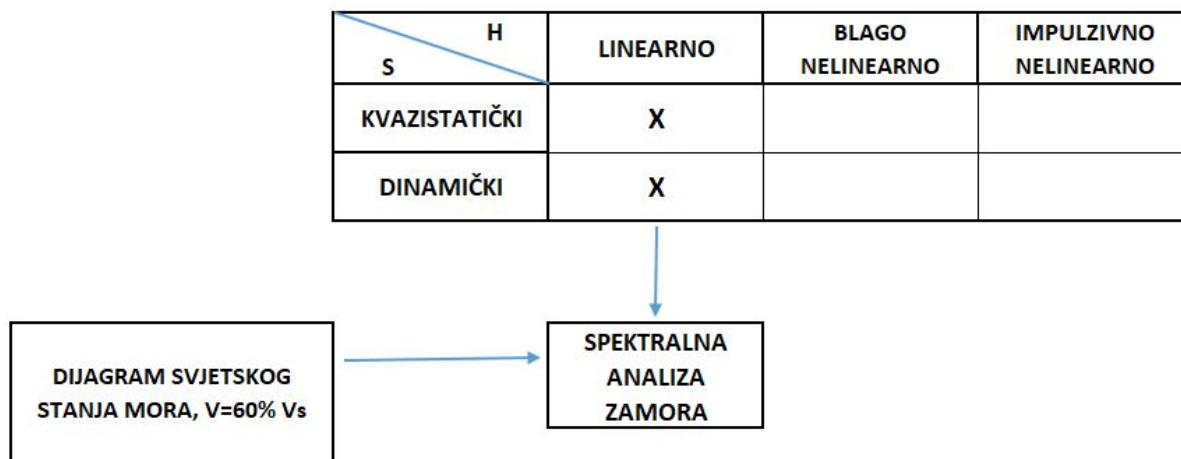
Tablica 2. *WhiSp* metodologija

<i>WhiSp</i> notacija			
	Kontejnerski brodovi		Svi ostali brodovi
	$300 \text{ m} < L < 350 \text{ m}$	$L > 350 \text{ m}$	
<i>WhiSp1</i>	Obavezno	Dobrovoljno	Dobrovoljno
<i>WhiSp2</i>	Dobrovoljno		
<i>WhiSp3</i>	Dobrovoljno	Dobrovoljno	Dobrovoljno

Primjena viših razina *WhiSp*-a općenito podrazumijeva primjenu nižih razina metodologije. Zapravo, kada se traži provedba proračuna na *WhiSp2* razini podrazumijeva se da je proračun na *WhiSp1* razini obavezan, analogno tome, kada je potrebna *WhiSp3* razina, proračun na razini *WhiSp1* i *WhiSp2* su obavezni.

### 3.1. *WhiSp1*

*WhiSp1* razina je povezana sa zamorom brodske konstrukcije uzrokovana pruženjem. Cjelokupni postupak proračuna može se vidjeti na Slici 12.

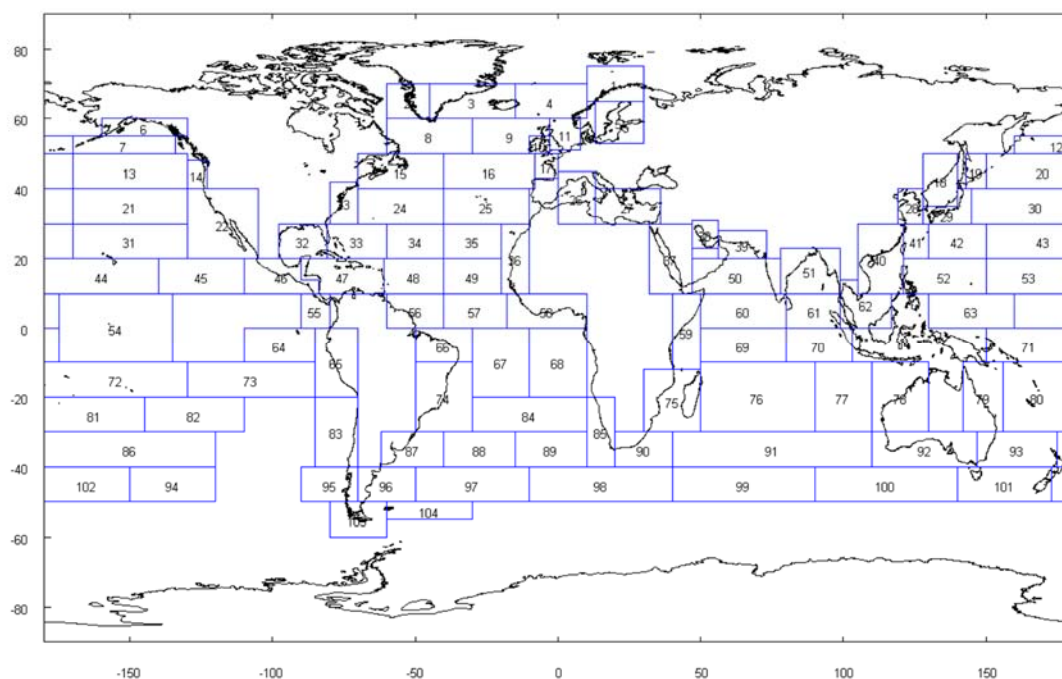


Slika 12. Postupak proračuna za *WhiSp1* razinu, S-strukturni odziv, H- hidrodinamičko opterećenje [21]

Kao što se može vidjeti, definicija *WhiSp1* razine je relativno jednostavna i koristi isti postupak spektralne analize zamora kao kod kvazistatičkog proračuna. Jedina razlika je ta što je linearni hidroelastični odziv uslijed pruženja uzet u obzir. Kako bi se odredila razina

lokalnog naprezanja pojedinog konstrukcijskog detalja potrebno je provesti tzv. *top-down* analizu [21]. *Top-down* postupak nam zapravo omogućuje da odzive s globalnog modela prenesemo na lokalni model koji želimo analizirati, tj. na strukturne detalje za koje provodimo ispitivanje. Prednost takvog postupka je da se analiza provodi relativno grubim modelom konačnih elemenata, te da se globalni proračun provodi samo jednom, a a temelju tih rezultata se u kasnijim fazama može analizirati bilo koji strukturni detalj. Alternativa takvom postupku je direktno ufinjavanje mreže u globalnom modelu, što je nepraktično kako zbog provedbe proračuna s većim brojem stupnjeva slobode, tako i zbog eventualnog naknadnog proračuna odziva dodatnih konstrukcijskih elemenata.

*WhiSpI* razina služi se valnim dijagramom svjetskih stanja mora, a on je opisan kao skup vjerojatnosti pojavljivanja valnih visina i valnih perioda. Opis tih vjerojatnosti dan je za određena geografska područja. Dijagrami ne sadrže informacije o smjeru valova i uobičajeno se temelje na vizualnim opažanjima i starijim statistikama koje se onda skupa ekstrapoliraju koristeći se analitičkim funkcijama. Na Slici 13, dan je prikaz podjele svih mora u 104 zasebna područja.



**Slika 13.** Svjetska mora podijeljena u 104 geografska područja [36]

Dijagrami stanja mora koji se koriste u *WhiSp* notaciji su dijagram svjetskog stanja mora te dijagram stanja mora Sjevernog Atlantika koji se koristi za ekstremne odzive. Kratkoročno stanje mora opisano je valnim spektrom što je funkcija spektralne gustoće vertikalnog pomaka površine mora. *Pierson-Moskowitz* valni spektar se najčešće koristi u *WhiSp* notaciji, a ponekad se koriste još *JONSWAP* spektar i *Ochi-Hubble* spektar [36].

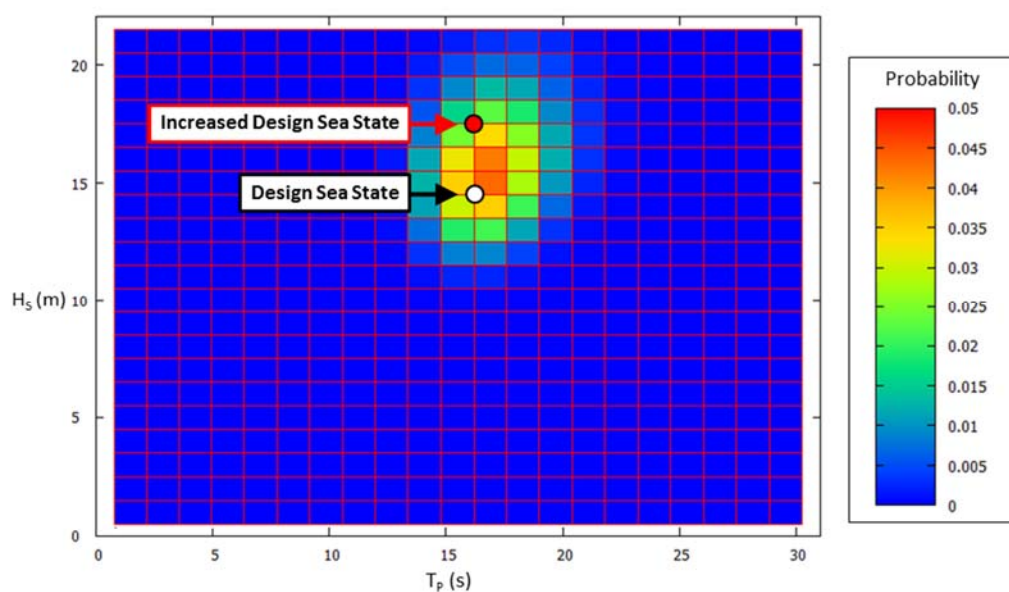
### 3.2. *WhiSp2*

Razina *WhiSp2* povezana je s provjerom globalne čvrstoće i u osnovi razmatra procjenu utjecaja podrhtavanja na granični vertikalni moment savijanja. Važno je napomenuti da je u ovoj razini metodologije u obzir uzeta samo granična čvrstoća a da provjeravanje na poptuštanje i izvijanje ostaje isto kao i kod kvazistatičkog pristupa [21].

Postupak započinje procjenom linearnog dugoročnog iznosa ukupnog vertikalnog momenta savijanja služeći se kvazistatičkim pristupom. Nakon što jednom pomoću kvazistatičkog pristupa odredimo vrijednost vertikalnog momenta savijanja, povišeno projektno stanje mora je određeno (eng. *IDSS- Increased Design Sea State*). Na Slici 14, prikazan je koncept povišenog stanja mora za ubrzanje konvergencije rezultata.

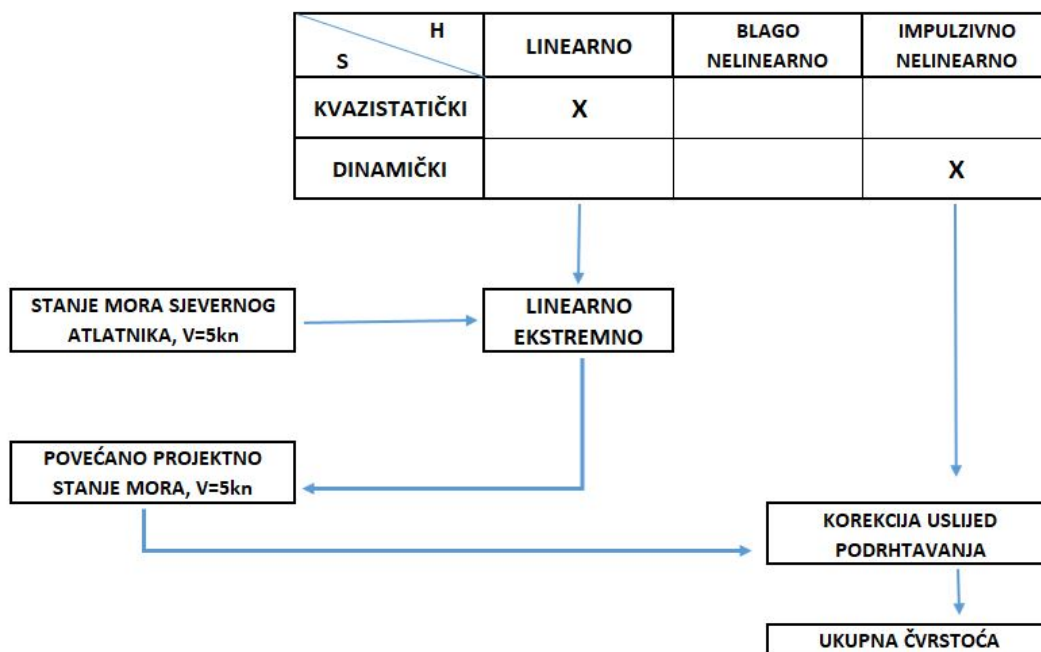
Ovakvo projektno stanje mora odgovara stanju s najvažnijim parametrima za određivanje vrijednosti vertikalnog momenta savijanja. Proračun nelinearnog podrhtavanja trebao bi biti unaprijed određen u odnosu na odgovarajući dugoročni moment savijanja dobiven kvazistatičkim pristupom. Omjer predstavlja korekciju uslijed podrhtavanja, Slika 15. Taj faktor se kasnije koristi pri određivanju granične čvrstoće za sve brodske sekcije. Valja spomenuti da se s ciljem povećanja konvergencije i smanjenja vremena potrebnog za izračun koristi koncept *IDSS* za proračun podrhtavanja prikazan u [36].





Slika 14. Koncept povišenog stanja mora za ubrzanje konvergencije rezultata

Proračunski postupak za *WhiSp2* razinu prikazan je na Slici 15.



Slika 15. Postupak proračuna za *WhiSp2* razinu [21]

### 3.3. *WhiSp3*

*WhiSp3* razina se odnosi na analizu zamora brodskih konstrukcija s utjecajem podrhtavanja trupa. Prvi korak u postupku je provedba spektralne analize zamora s uključenim pruženjem, tj. *WhiSp1* proračun. Proračun se provodi za niz projektnih stanja mora (eng. *DSSS - Design Sea States*) koja najviše doprinose zamornom oštećenju. Za sva ostala stanja mora korekcijski koeficijenti se dobivaju interpolacijom ili ekstrapolacijom a zamorni vijek se jednostavno dobije sumiranjem svih različitih doprinosa [21].

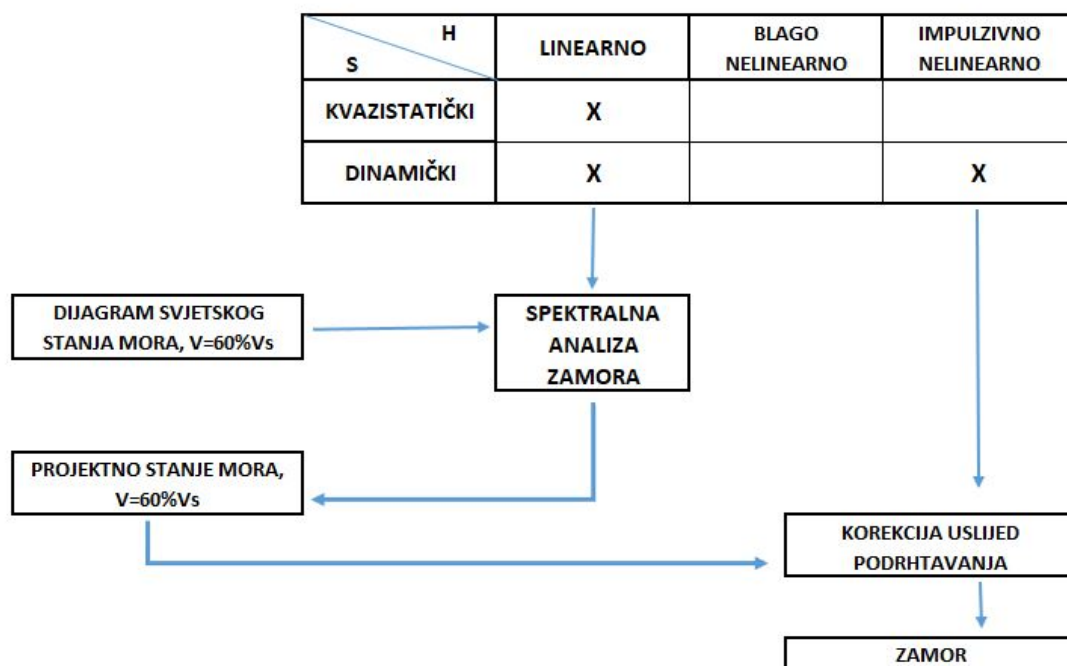
Za primjenu *WhiSp3* razine bitno je naglasiti ulogu i način računanja vremenskog faktora naprezanja lokalne strukture. Za kvalitativnu usporedbu oštećenja nastalih kvazistatičkim i dinamičkim naprezanjima, moramo izračunati vremenski faktor lokalnih naprezanja na kojima želimo provesti odgovarajuću procjenu zamornog vijeka [21].

Zbog činjenice da je korišten modalni pristup pri proračunu odziva hidroelastičnog podrhtavanja i zbog toga što je broj oblika vibriranja zapravo ograničen, ukupno lokalno naprezanje ne

može biti u potpunosti točno izračunato jednostavnim sumiranjem svih modalnih doprinosa zato što će doprinosi viših oblika vibriranja nedostajati. S druge strane, barem za sada, ne možemo si priuštiti izravan proračun naprezanja rješavanjem 3D MKE strukturnih problema metodom konačnih elemenata u svakom koraku. Uzimajući u obzir sve navedene razloge, vremenski faktor opterećenja može se odrediti približno, i to na tri načina [21].

Najjednostavnija metoda sastoji se od zadržavanja modalnih doprinosa, a mnogo sofisticiranija metoda temelji se na konceptu konverzijskih matrica. Budući da nas zanima omjer dva različita tipa naprezanja (linearno kvazistatičko i podrhtavanje), obično se naprije primijeni metoda modalnog razdvajanja s pretpostavkom da će dati dovoljno dobre početne informacije o relativnom utjecaju podrhtavanja na zamor brodske konstrukcije.

Postupak metodologije za *WhiSp3* razinu prikazan je na Slici 16.



Slika 16. Postupak proračuna za *WhiSp3* razinu [21]

## 4. OPIS PROGRAMSKE PODRŠKE

### 4.1. Programski paket HOMER

Alat koji je korišten u izradi ovog rada je programski paket za izravne hidrostrukturne proračune HOMER. HOMER je komercijalni alat razvijen u istraživačkom odjelu klasifikacijskog društva *Bureau Veritas*, Pariz, te je ustupljen za izradu ovog rada.

HOMER se temelji na sprezanju hidrodinamičkog programskog paketa HydroSTAR s nizom programskih paketa za strukturnu analizu konstrukcija, od kojih se najčešće koristi NASTRAN [37,38].

Moduli programskog alata HOMER nude sljedeće:

- odziv konstrukcije za ekstremne uvjete opterećenja radi provjere na popuštanje ili izvijanje,
- zamorni vijek konstrukcijskih detalja služeći se automatskom tzv. *top-down* postupku određivanja deformacija s globalnog na lokalni model i preračunavanje tlakova na lokalni model,
- konzistentnu ravnotežu između hidrodinamičkih tlakova i inercijskih opterećenja. Odziv konstrukcije se može promatrati ili kvazistatičkim (nema utjecaja hidrodinamičkih opterećenja) ili dinamičkim pristupom, temelji se na modalnoj dekompoziciji i omogućava simulaciju hidroelastičnih fenomena (npr. pruženje kontejnerskih brodova) [37].

Kod određivanja hidrodinamičkih odziva, HOMER koristi sljedeće teorijske pristupe:

- linearna opterećenja uslijed uzgona, trupa i tankova – rješava se u frekvencijskoj domeni,
- nelinearna Froude-Krylovljeva korekcija tlakova – rješava se u vremenskoj domeni,
- sprezanje pomorstvenosti/zapluskivanja,
- konfiguracija složenih tijela,
- nelinearna/linearizirana Morisonova opterećenja na vitkim elementima [37].

## 4.2. Postupak proračuna

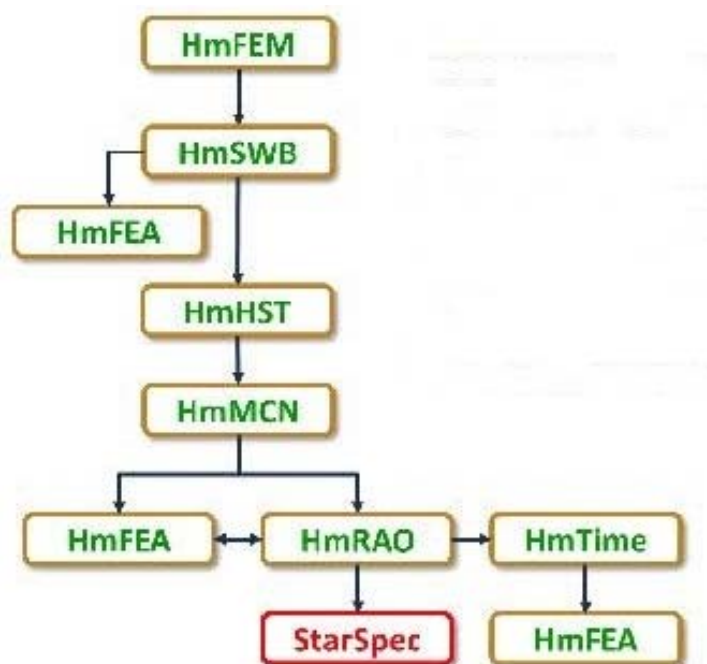
Korištenje programskog alata HOMER zahtijeva pridržavanje striktne procedure bez preskakanja koraka. Na Slikama 17, i 18, prikazan je dijagram toka i način komunikacije modula unutar HOMER-a.

Moduli kojima se unutar HOMER-a izvršavaju određene radnje su [6]:

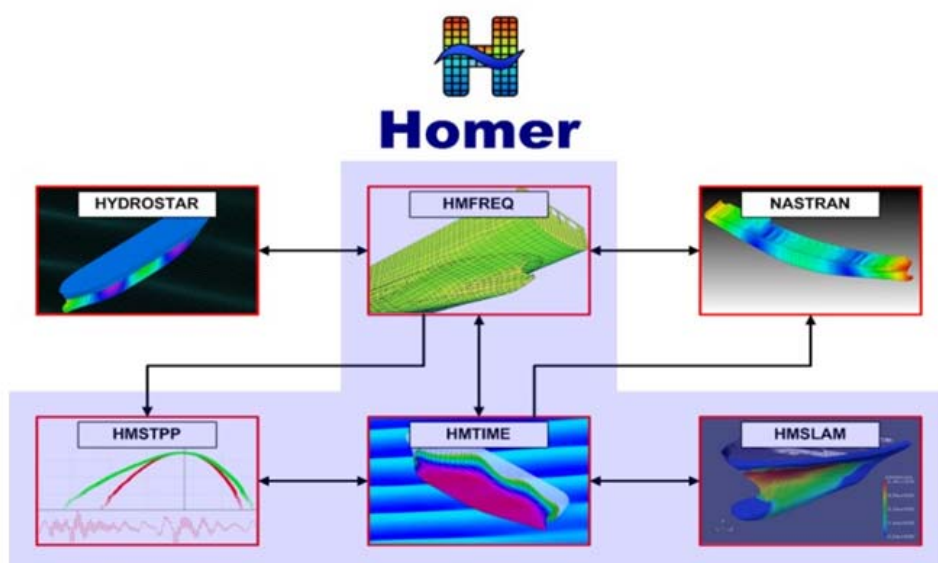
- HMFEM: izračunava masu i inercijska svojstva modela konačnih elemenata, te provodi modalnu analizu,
- HMSWB: provodi se balansiranje modela (provjeravajući jednakost ukupne mase i uzgona), kako bi se pronašao ravnotežni položaj,
- HMHST: proračun hidrodinamičkih tlakova koristeći programski alat HydroSTAR,
- HMMCN: rješava mehanički problem, tj., diferencijalnu jednadžbu gibanja,
- HMFEA: provodi analizu čvrstoće metodom konačnih elemenata s obzirom na različite slučajeve opterećenja,
- HMRAO: generira prijenosnu funkciju odziva (eng. *RAO - Response Amplitude Operator*),
- HMTIME: provodi vremensku simulaciju hidroelastičnog odziva.

Tri glavna načina za postizanje uravnoteženog strukturnog modela predstavljena pomoću numeričkog programa HOMER su prema [6,35]:

- ponovni proračun tlaka u točkama modela konstrukcije,
- odvojeni prijenos različitih komponenti tlakova u strukturnim točkama i izračun različitih hidrodinamičkih koeficijenata preko strukture mreže konačnih elemenata,
- rješavanje jednadžbi gibanja koristeći se ranije izračunatim hidrodinamičkim koeficijentima i inercijskim svojstvima modela konačnih elementa.



Slika 17. Dijagram toka proračuna hidroelastičnosti [6]



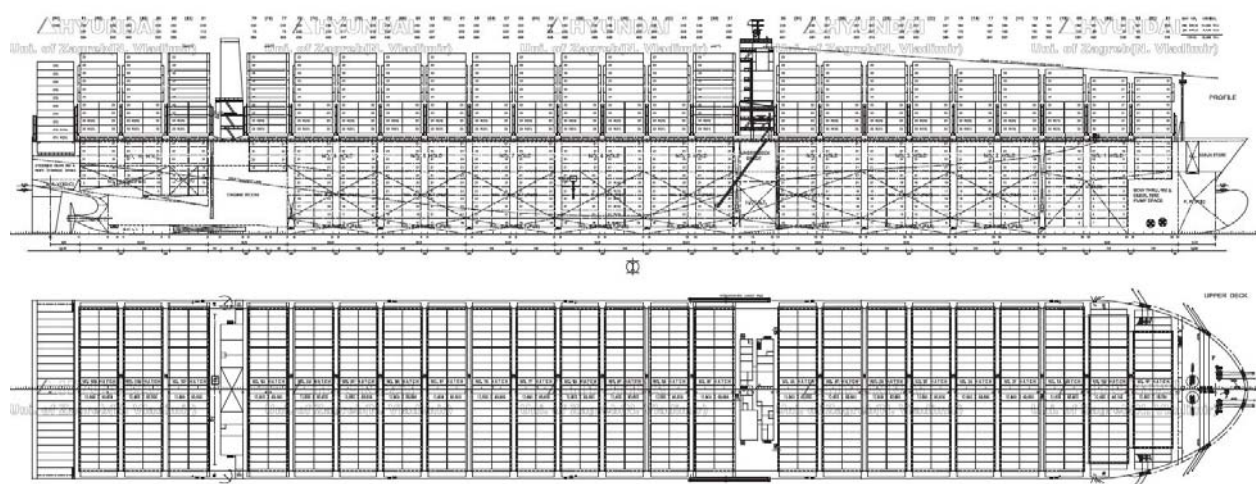
Slika 18. Komunikacija modula unutar programskog paketa HOMER

## 5. TEHNIČKI OPIS ANALIZIRANOG BRODA I KORIŠTENIH NUMERIČKIH MODELA

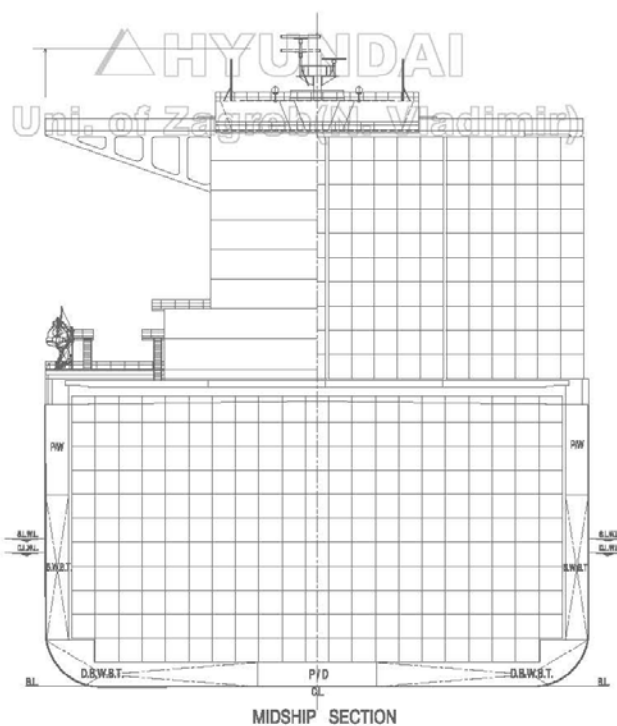
Brod za koji je provedena analiza hidroelastičnog odziva izgrađen je u južnokorejskom brodogradilištu *Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.* iz Ulsana. U vrijeme primopredaje (2013. god.), analizirani brod je bio najveći u svijetu svojoj klasi, te je u plovidbi prikazan na Slici 19. Na Slici 20 prikazan je opći plan broda, a na Slici 21 njegov poprečni presjek.



Slika 19. Analizirani kontejnerski brod u plovidbi [39]



Slika 20. Opći plan analiziranog broda



Slika 21. Presjek analiziranog broda na glavnom rebru



### 5.1. Glavne značajke i dimenzije analiziranog broda

Kontejnerski brod za koji je provedena analiza hidroelastičnosti je kapaciteta 19000 TEU, njegovi opći podaci dani su Tablici 3 [35,38].

**Tablica 3. Tehnički podaci analiziranog broda**

Duljina preko svega, $L_{OA}$ [m]	400
Duljina između okomica, $L_{PP}$ [m]	383
Širina, $B$ [m]	58,6
Visina, $H$ [m]	30,5
Projektni gaz, $T_d$ [m]	14,5
Gaz na ljetnoj vodnoj liniji, $T_s$ [m]	16
Nosivost na punom gasu, $\Delta$ [t]	212913
Brzina broda u službi, $v_s$ [čv]	23

### 5.2. Numerički model

Potrebno je napomenuti da ne postoji jedinstvena metodologija za računanje ekstremnih odziva i ukupnog zamornog oštećenja, stoga [36] sadrži popis programskih alata i uputa kojima se može to izračunati. Ovisno o tome što je cilj simulacija odnosno proračuna, dana je dugoročna metodologija koja se koristi zajedno s određenim hidrostrukturnim modelom. Da bi zadovoljili sve tipove hidrostrukturnog međudjelovanja brodskih i pomorskih konstrukcija prema [36], koristi se numerički alat HOMER opisan u poglavlju 4. HOMER se koristi za direktan prijenos opterećenja nastalih od okoline u kojoj se brod nalazi na strukturni model konačnih elemenata [35].

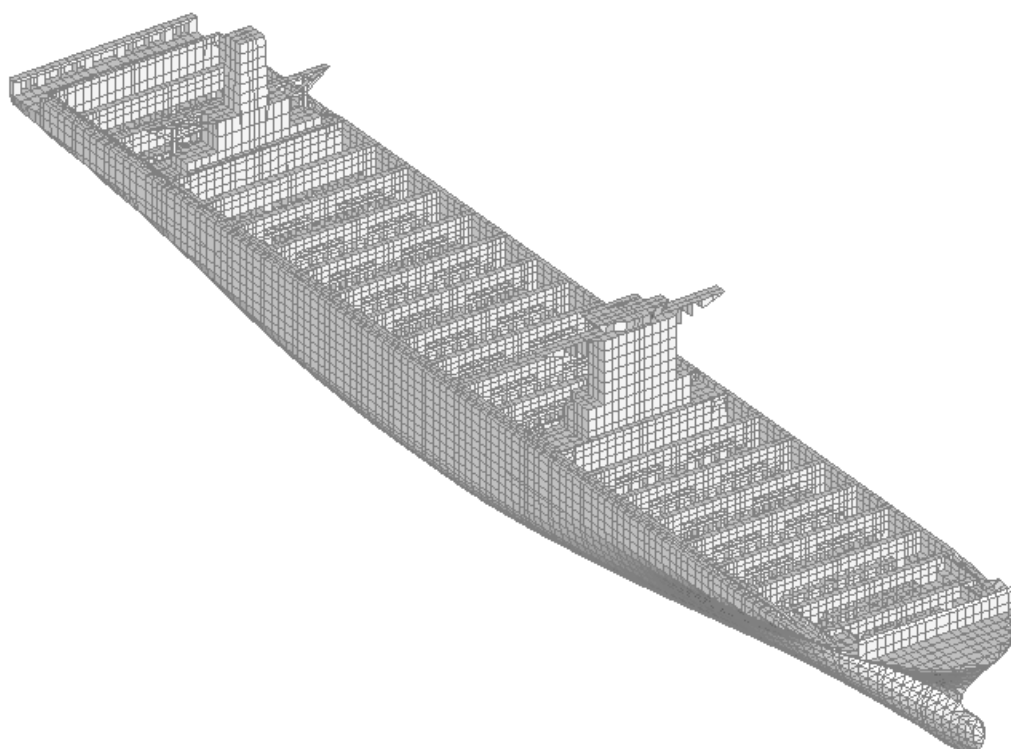
Proračun hidroelastičnosti provodi se pomoću numeričkog modela koristeći se već ranije spomenutim alatima HOMER odnosno HydroSTAR-om koji je korišten za hidrodinamičke proračune i NASTRAN-om koji služi za proračune odziva konstrukcije. Za proračun zamornog vijeka ili oštećenja potrebno je znati koncentraciju naprezanja u odabranim detaljima i općenito se mogu izračunati finijom mrežom ili *top-down* metodom. Kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za provođenje proračuna, detalje za koje provodimo proračun zamora modeliramo finijom mrežom konačnih elemenata za razliku od globalnog modela.

Stoga se koristi *top-down* pristup što znači da se prvo provede proračun grubog modela i sa njega se zatim prenesu pomaci na fini model tj. na granice lokalne finije mreže. Na taj način proračun s finijom mrežom provesti će se u drugom koraku s opterećenjima definiranim zadanim pomacima dobivenim iz prvotnog proračuna i lokalnih tlakova i inercijskih opterećenja dobivenih iz drugog koraka. Takav postupak morao bi se provoditi za svako stanje (kombinacija stanja krcanja broda, valne frekvencije i susretnog kuta) i za realni i imaginarni dio valnog opterećenja, što rezultira kao naprezanje u svakom pojedinom strukturnom detalju koji se prikazuje s prijenosnim funkcijama [35].

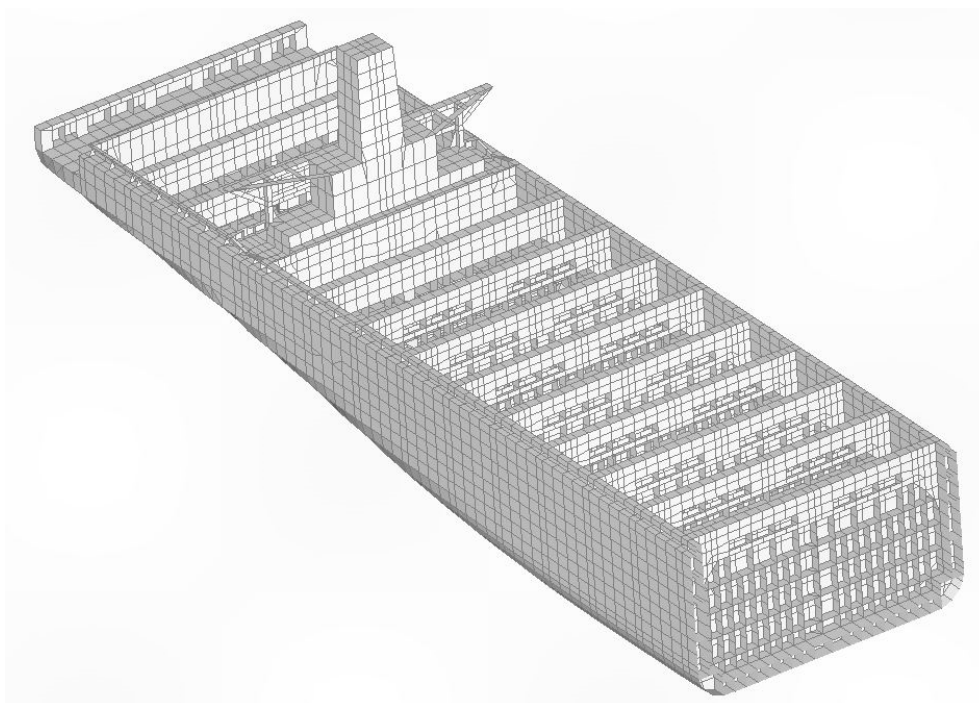
Posebno treba imati na umu odvajanje kvazistatičkih i dinamičkih dijelova odziva da bi se osigurala propisana konvergencija rezultata kao što je navedeno u poglavlju 2.

U *WhiSpI* metodologiji, koja je i primijenjena u ovom radu, u skladu sa [36], analiza zamora je provedena za samo jedno stanje. Stanja mora modelirana su prema *Pierson-Moskowitz* spektru i „cos n“ funkciji raspršivanja za  $n=2$ . Brzina broda u službi uzima se kao 60% od projektne brzine za sva stanja mora, dok se vrijednost susretnog kuta razmatra kao pravilno raspoređeno od  $0^\circ$  do  $350^\circ$  s korakom od  $10^\circ$  [35].

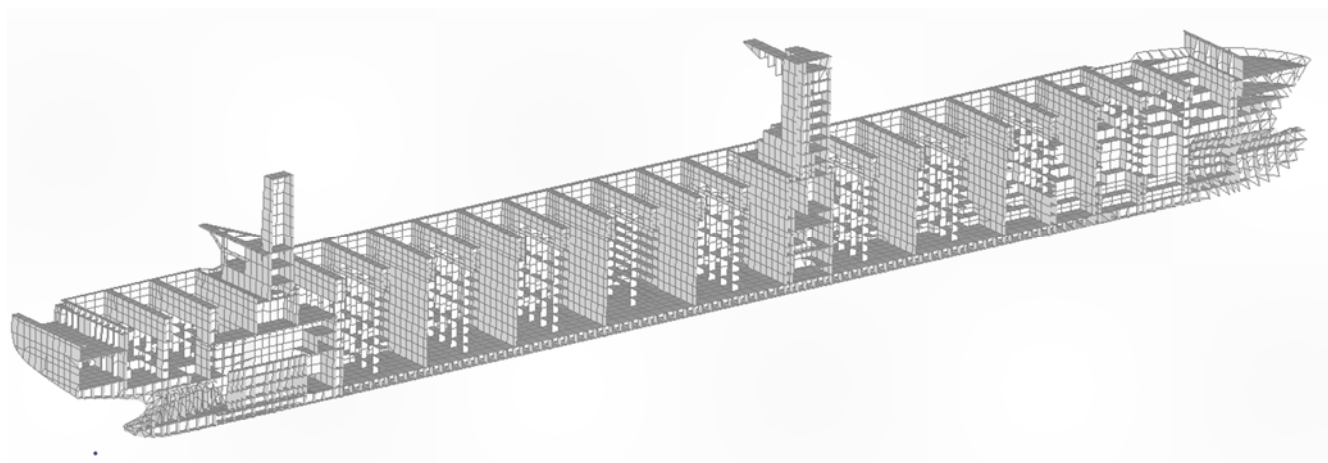
Model konačnih elemenata razmatranog broda opisanog u poglavlju 5.1. sastoji se od 91076 konačnih elemenata i 30050 čvorova, Slike 22, 23 i 24. Na tom modelu odabrani su određeni konstrukcijski detalji (njih 8) za koje će se s ufinjenom mrežom konačnih elemenata napraviti analiza zamornog vijeka. Osim MKE modela (gruba mreža i fina mreža konačnih elemenata) brodske konstrukcije, opisanog postupka proračuna i numeričkog alata HOMER-a potrebno je još generiranje integracijske mreže i hidrodinamičke mreže. Integracijska i hidrodinamička mreža, Slike 25 i 26, su dobivene direktno iz strukturnog modela. Hidrodinamička mreža konačnih elemenata sastoji se od 5984 „mokrih“ panela. Također, na Slici 27, prikazani su strukturni detalji za koje je provedena spektralna analiza zamora.



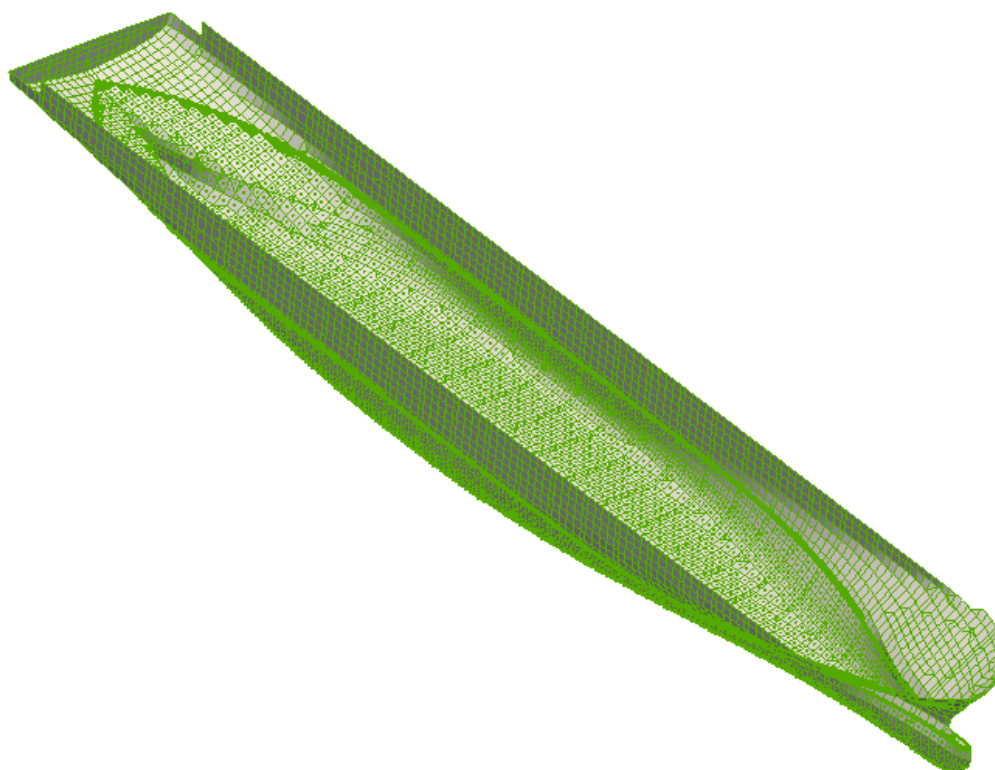
**Slika 22. Globalni model konačnih elemenata ultra velikog kontejnerskog broda**



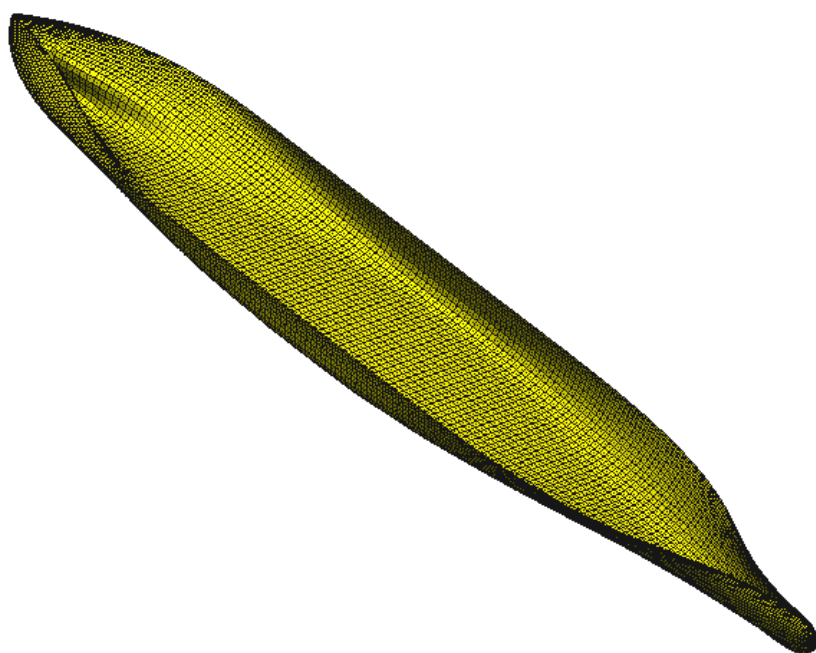
**Slika 23. Poprečni presjek broda**



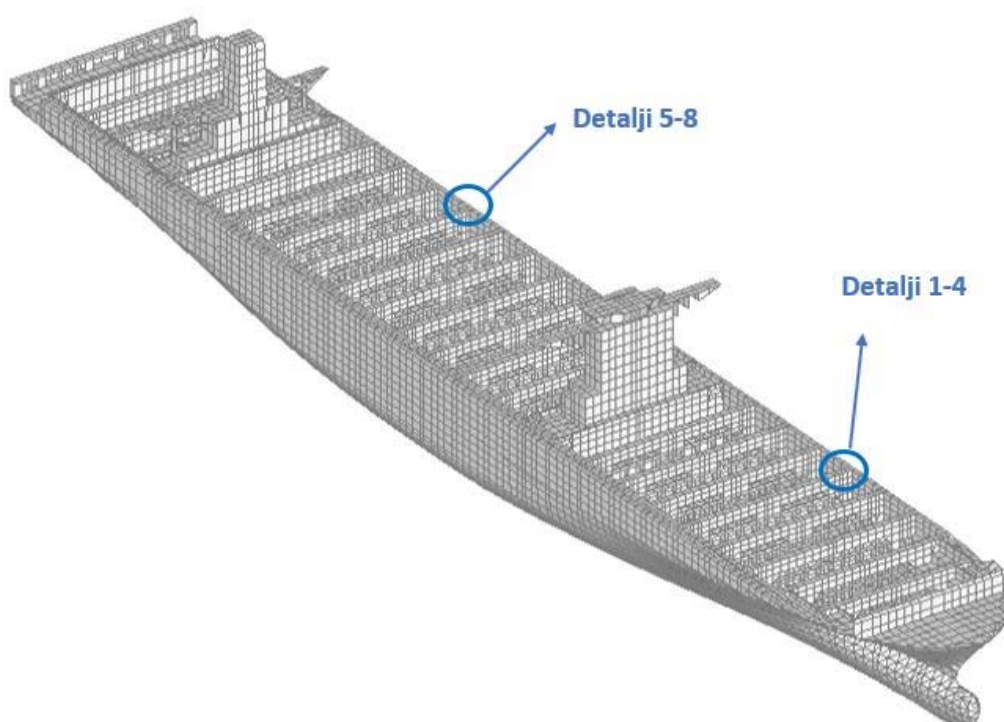
**Slika 24. Uzdužni presjek broda**



**Slika 25. Prikaz integracijske mreže**



Slika 26. Prikaz hidrodinamičke mreže



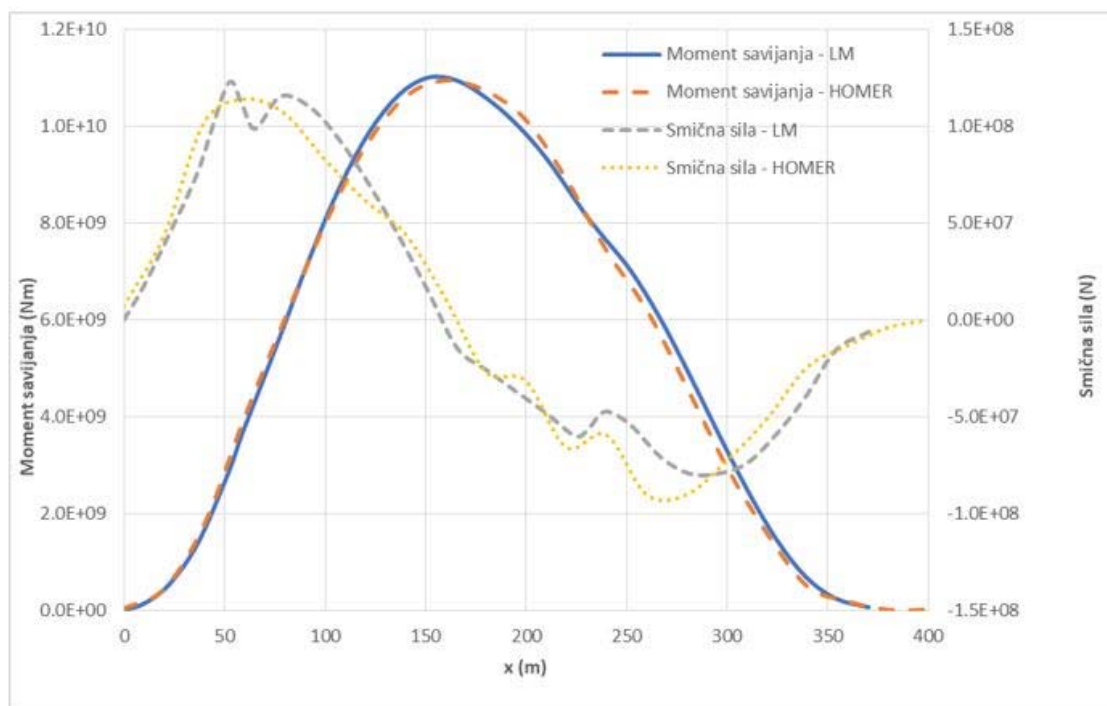
Slika 27. Pozicija analiziranih konstrukcijskih detalja na brodu

## 6. PRORAČUN ZAMORNOG VIJEKA BRODA S UTJECAJEM LINEARNOG PRUŽENJA

Za provođenje hidroelastične analize treba se pridržavati točno određenog slijeda različitih operacija kako bi postupak bio točan. Prvi korak u provođenju takve analize je određivanje suhih prirodnih vibracija. Nakon toga, potrebno je napraviti proračun deformacija i naprezanja na mirnoj vodi, te nekoliko provjera međudjelovanja spomenutih modela (strukturni, integracijski, hidrodinamički) i njihovog pozicioniranja u globalnom koordinatnom sustavu. U tom smislu, preporučljivo je odraditi sljedeće provjere:

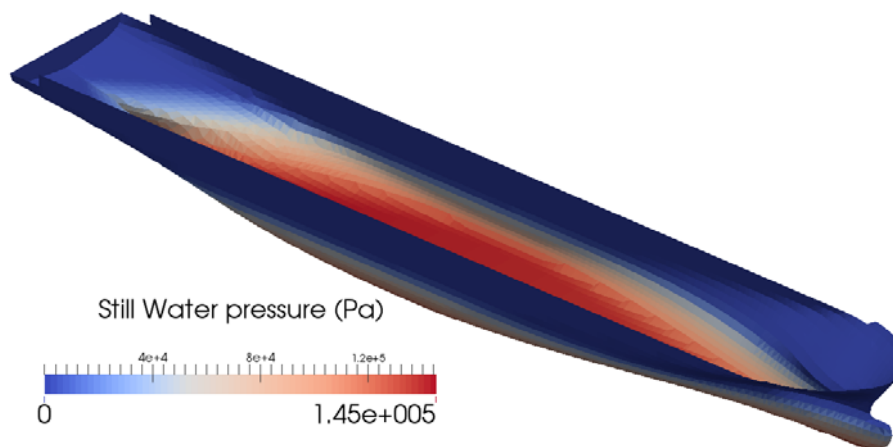
- usporediti izračunate momente savijanja na mirnoj vodi i smične sile dane u knjizi trima i stabilneta,
- provjeriti hidrostatičke tlakove na oplati broda na mirnoj vodi,
- provjeriti položaj strukturnog modela te integracijske i hidrodinamičke mreže s obzirom na slobodnu površinu,
- potvrditi poziciju lokalnih modela na koje je primijenjen *top-down* postupak,
- provjeriti deformaciju savijanja na mirnoj vodi (za kontejnerske brodove očekivano je stanje pregiba) kao i naprezanja za globalni i lokalni model konačnih elemenata.

Na Slici 28, jasno se vidi slaganje numeričkih rezultata dobivenih HOMER-om s podacima iz stanja krcanja (eng. *LM- loading manual*) [35].

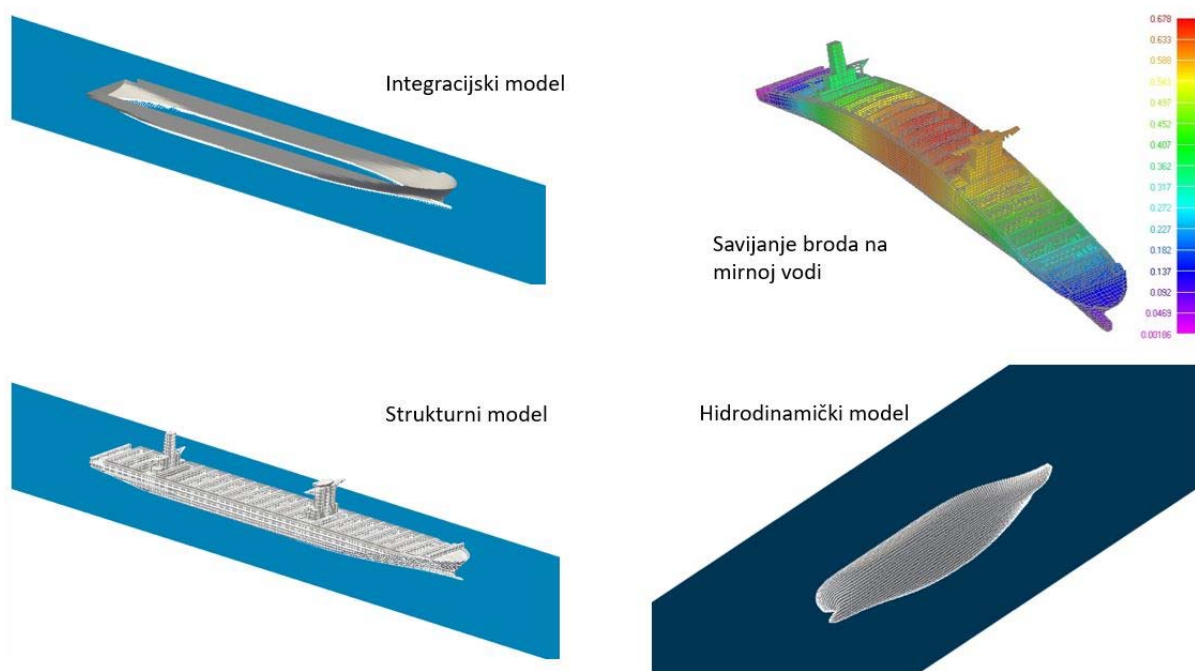


Slika 28. Moment savijanja na mirnoj vodi i smične sile [40]

Prikaz distribucije hidrostatskog tlaka na oplati broda na mirnoj vodi dan je na Slici 29, a odgovarajuće pozicioniranje strukturnog, integracijskog i hidrodinamičkog modela u odnosu na vodnu liniju, te savijanje broda na mirnoj vodi provjereni su na Slici 30.



Slika 29. Distribucija hidrostatskog tlaka na oplati broda na mirnoj vodi [40]

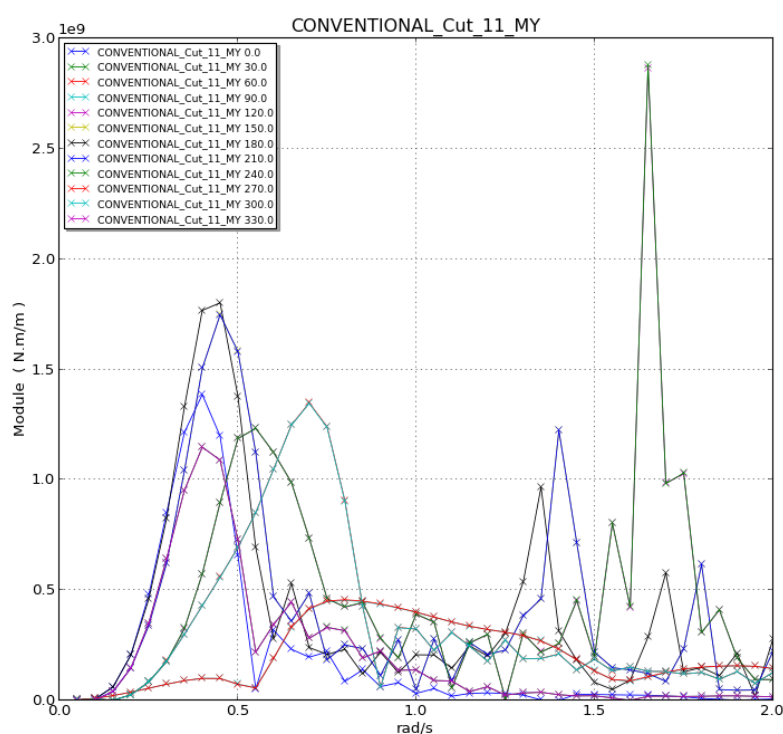


**Slika 30. Pozicioniranje modela s obzirom na slobodnu površinu i savijanje broda na mirnoj vodi [35]**

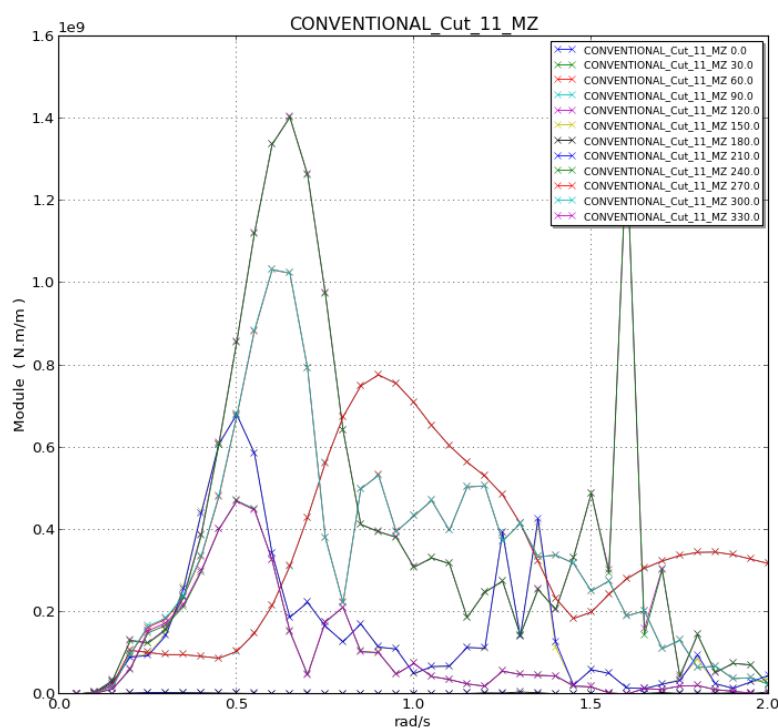
Hidroelastična analiza simultano razmatra gibanje broda na valovima i njegove elastične deformacije, što je vidljivo iz prijenosnih funkcija vertikalnog momenta savijanja, Slika 31, prijenosnih funkcija horizontalnog momenta savijanja, Slika 32, te prijenosnih funkcija momenta uvijanja, Slika 33.

Proračun zamornog vijeka s utjecajem linearnog pruženja proveden je za osam odabranih detalja. Detalji za koje je proveden proračun spektralnog zamora dani su na Slici 34 i 35.

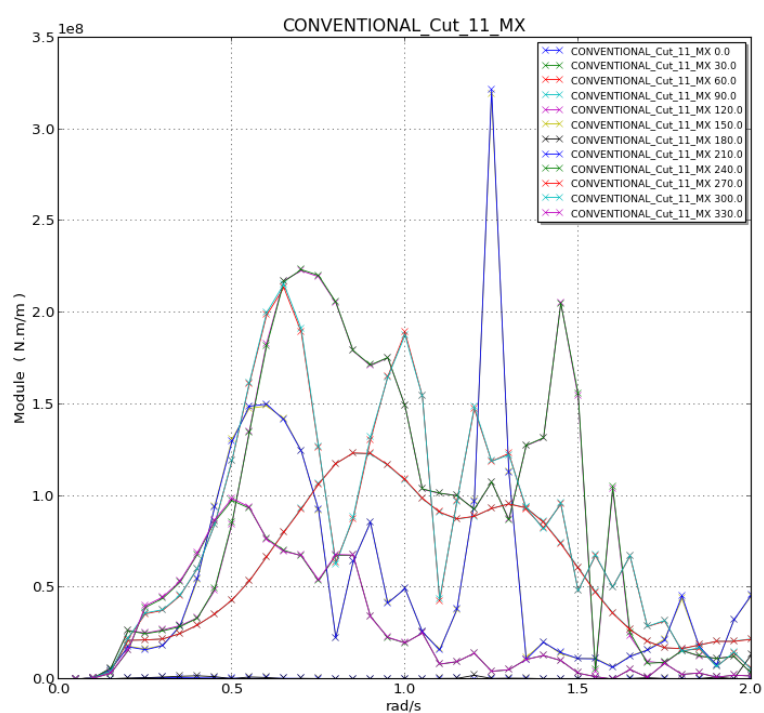




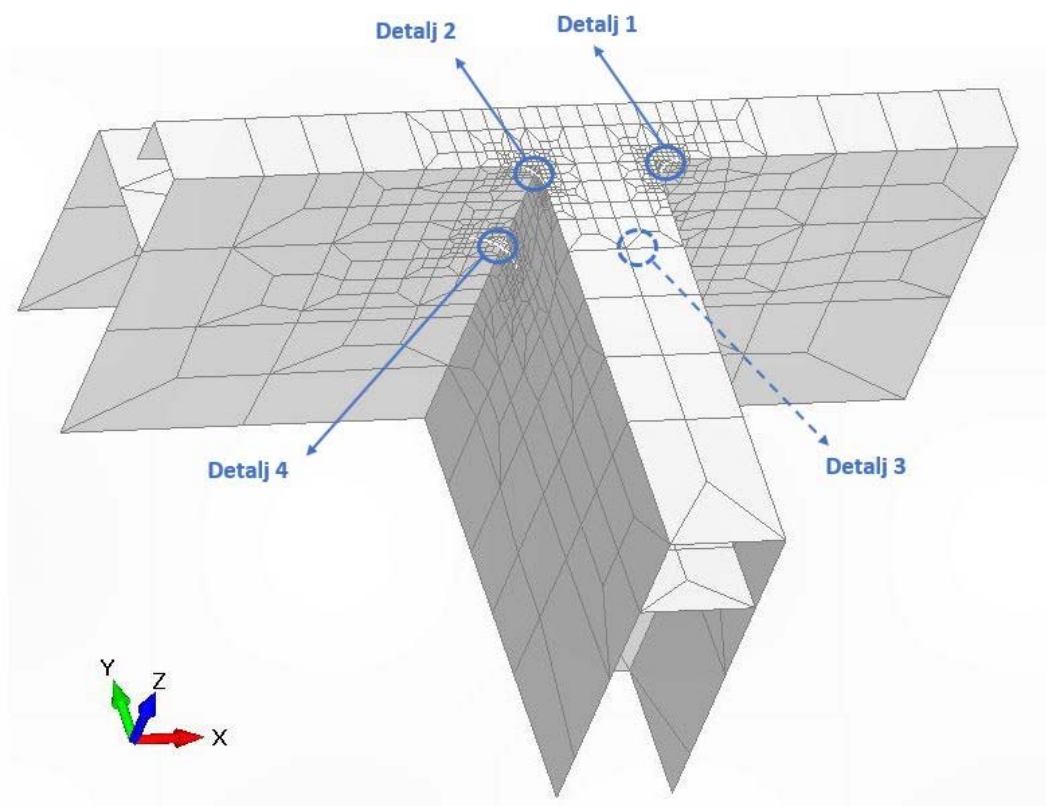
Slika 31. Prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja s utjecajem linearnog pruženja za različite susretne kutove



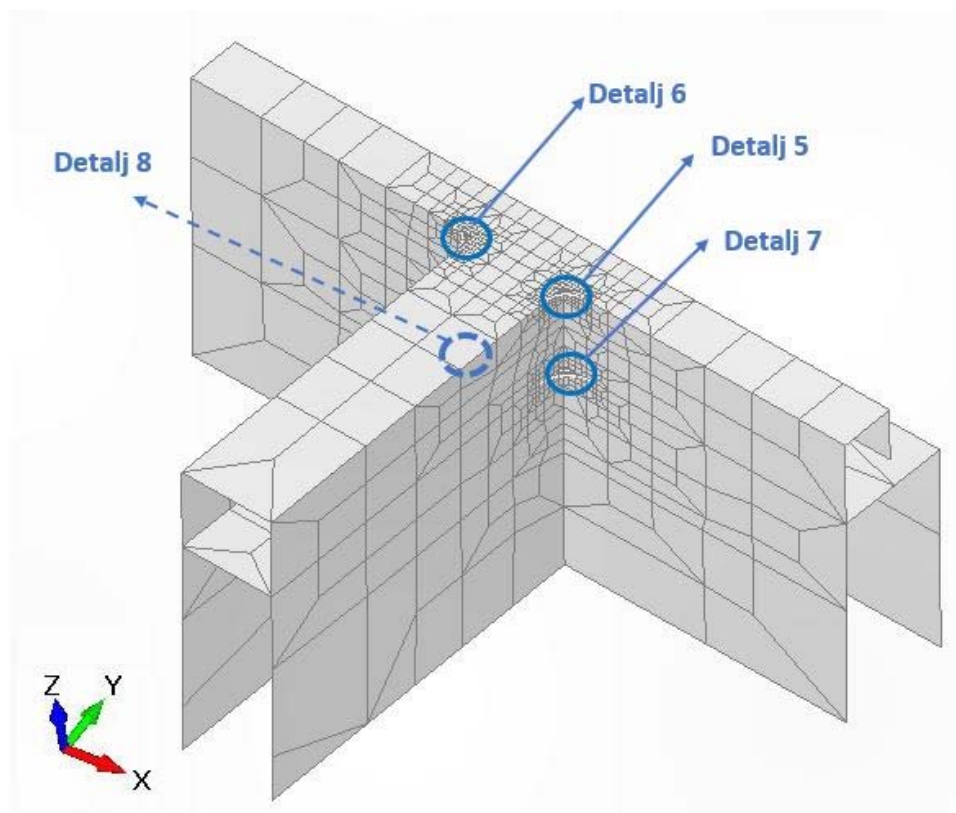
Slika 32. Prijenosne funkcije horizontalnog momenta savijanja s utjecajem linearnog pruženja za različite susretne kutove



**Slika 33. Prijenosne funkcije momenta uvijanja s utjecajem linearnog pruženja za različite susretne kutove**

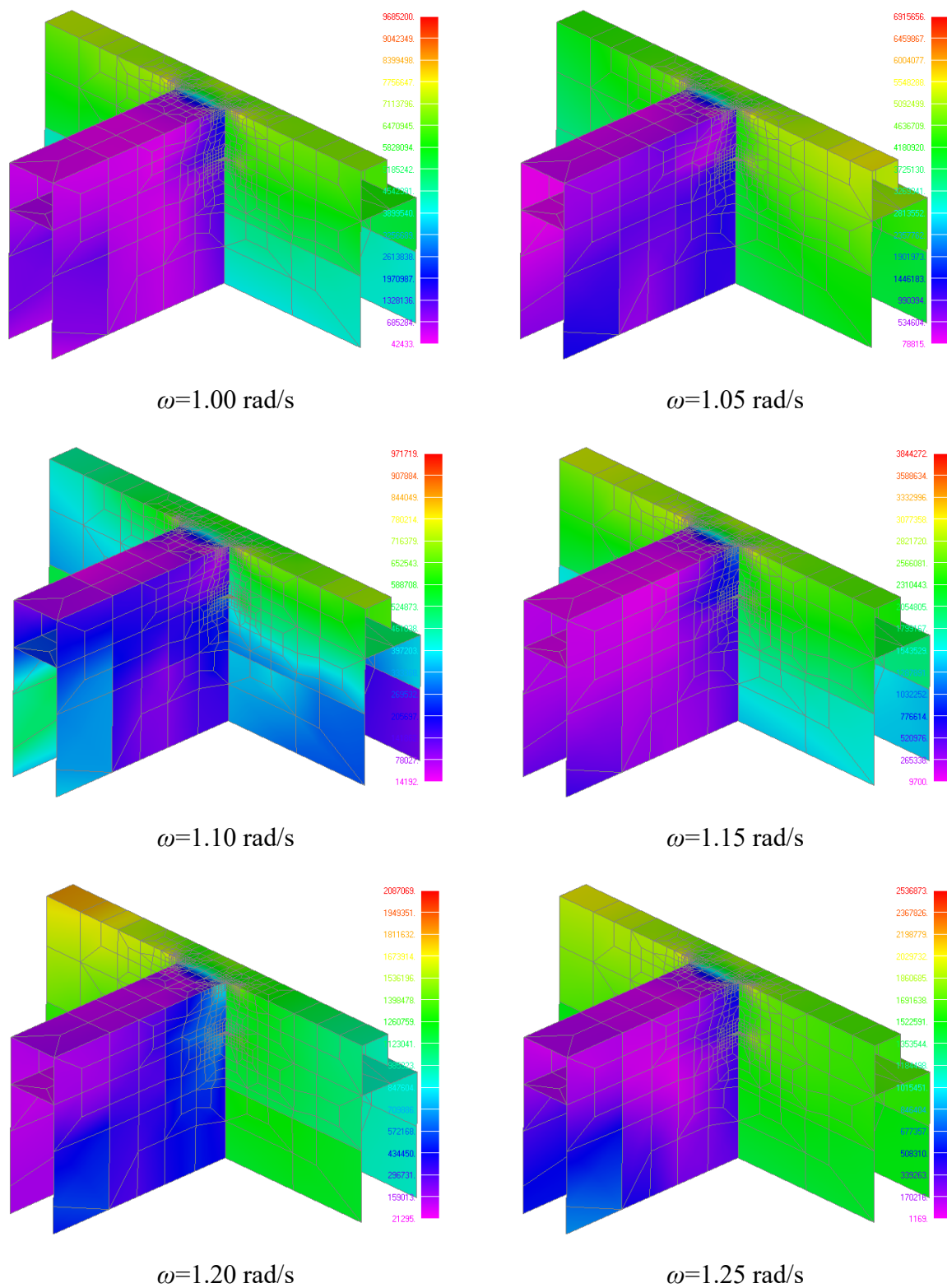


**Slika 34. Prikaz analiziranih detalja 1-4**



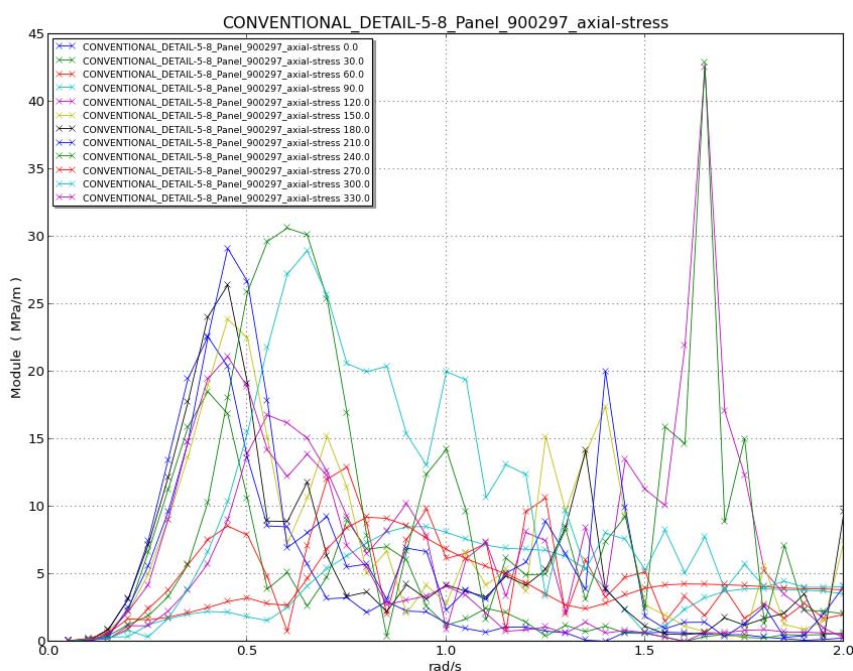
**Slika 35. Prikaz analiziranih detalja 5-8**

Proračun je proveden za jednu brzinu plovidbe, te dva skupa stanja mora, svjetsko stanje mora i stanje mora Sjevernog Atlantika kako bi se usporedio utjecaj stanja mora na zamorni vijek konstrukcijskih detalja. Nadalje, za oba stanja mora provedena su četiri proračuna sa različitim kutovima nailaska valova i to sa korakom od  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $22,5^\circ$  i  $30^\circ$ . Iz tih su podataka pomoću modula StarSpec programskog paketa HydroSTAR izračunata zamorna oštećenja svakog pojedinog detalja te je analiziran utjecaj prijenosnih funkcija naprezanja na zamorno oštećenje. Na Slici 36, prikazana su von Mises naprezanja jednog strukturnog detalja za nekoliko uzastopnih susretnih frekvencija.



**Slika 36. Von Mises naprezanja u analiziranom strukturnom detalju za nekoliko uzastopnih susretnih frekvencija**

Kao rezultat provođenja hidrodinamičkog proračuna pomoću programskog alata HOMER dobivene su prijenosne funkcije naprezanja, koje su za ilustraciju, za detalj 6 prikazane na Slici 37. Rezultati proračuna zamornog vijeka analiziranih strukturnih detalja dani su u Tablicama 4 i 5.



Slika 37. Prijenosna funkcija naprezanja sa utjecajem pruženja za detalj 6

Na Slici 38, prikazan je primjer ulazne datoteke modula StarSpec koji je korišten za spektralnu analizu zamora strukturnih detalja.

[illegible]

**Slika 38. Primjer ulazne datoteke modula StarSpec programskog paketa HydroSTAR za provedbu spektralne analize**

**Tablica 4. Zamorni vijek detalja brodske konstrukcije [god] za svjetsko stanje mora**

	Kut nailaska valova sa korakom od 10°		Kut nailaska valova sa korakom od 15°		Kut nailaska valova sa korakom od 22,5°		Kut nailaska valova sa korakom od 30°	
Br.	Kvazistatično	Ukupno	Kvazistatično	Ukupno	Kvazistatično	Ukupno	Kvazistatično	Ukupno
1.	2204,68	1685,37	2360,04	1877,56	2534,01	2117,57	2794,61	2305,7
2.	2073,81	1596,73	2251,39	1869,5	2383,87	2048,83	2542,47	2147,37
3.	1840,15	1177,8	2289,11	1394,2	2688,56	1729,10	3277,92	2242,71
4.	1290,86	877,74	1419,96	1025,79	1527,73	1164,96	1508,04	1230,02
5.	140,68	110,24	147,85	120,83	154,42	127,57	158,43	131,54
6.	166,99	129,19	171,77	138,47	178,79	145,58	189,21	154,93
7.	107,84	58,52	114,13	63,22	119,99	66,64	119,88	72,85
8.	160,92	77,77	170,71	83,67	176,02	86,63	174,77	96,40

**Tablica 5. Zamorni vijek detalja brodske konstrukcije [god] za plovidbu u Sjevernom Atlantiku**

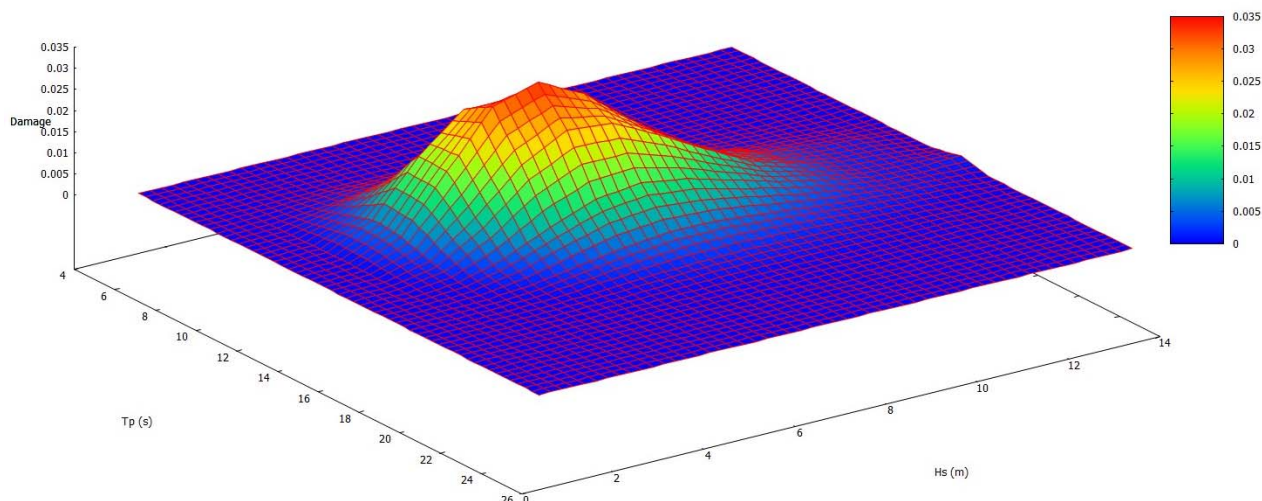
	Kut nailaska valova sa korakom od 10°		Kut nailaska valova sa korakom od 15°		Kut nailaska valova sa korakom od 22,5°		Kut nailaska valova sa korakom od 30°	
Br.	Kvazistatično	Ukupno	Kvazistatično	Ukupno	Kvazistatično	Ukupno	Kvazistatično	Ukupno
1.	543,57	440,54	592,69	492,61	627,77	544,96	675,07	579,72
2.	503,43	412,34	537,15	467,94	568,65	509,65	597,63	527,26
3.	446,14	329,25	604,85	402,06	690,18	478,07	805,81	587,76
4.	319,92	240,17	320,12	269,97	339,2	294,68	355,23	304,81
5.	37,62	31,25	39,31	33,76	40,93	35,43	41,9	36,34
6.	44,75	36,51	45,96	38,81	47,7	40,61	49,79	42,48
7.	33,36	21,78	35,06	23,36	36,61	24,45	37,92	25,72
8.	53,32	30,7	55,85	32,73	56,45	33,26	58,4	35,16



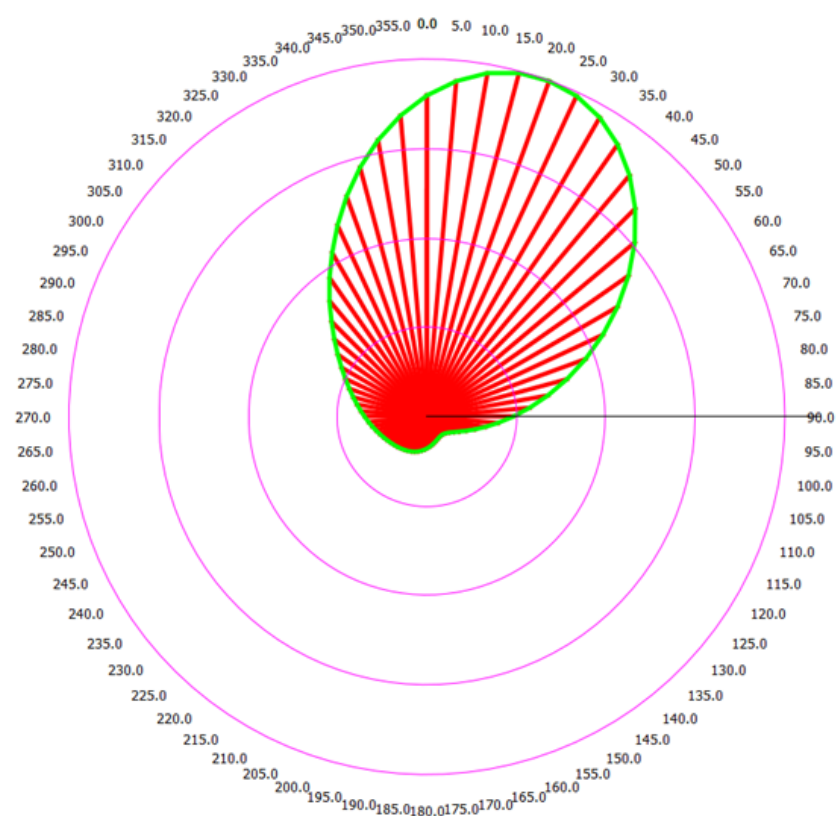
Na Slikama 39 i 40, prikazan je doprinos pojedinih stanja mora na zamorno oštećenje strukturnog detalja te dominantni susretni kut kod kojega je zamorno oštećenje najveće. Navedeni rezultati, raspoloživi su za svaki detalj konstrukcije, pri čemu su ispod prikazani samo oni za detalj 6, kao reprezentativni.

Rezultati prikazani u Tablici ukazuju da svi analizirani strukturni detalji zadovoljavaju *WhiSp1* klasnu notaciju, koja propisuje da zamorni vijek s utjecajem linearnog pruženja mora biti veći od 25 godina. Isto rako, vidljivo je da je izračunati zamorni vijek s utjecajem linearnog pruženja redovito manji nego bez njega, što potvrđuje osnovne hipoteze teorije i ukazuje da se spomenuti fenomen mora uzeti u obzir kod brodova relativno manje krutosti. Naposljetku, valja istaknuti da se prema smjernicama *WhiSp* notacije korak suretnog kuta uzima u iznosu od  $10^\circ$ . Pri tome je vidljivo da ukoliko se primijeni manji frekvencijski korak, izračunato zamorno oštećenje može biti potcijenjeno. Stoga se čini da su s postojećom razinom znanja još uvijek potrebni prilično dugotrajni proračuni zamora.

Važnost utjecaja operativnih uvjeta na odziv brodske konstrukcije vidljiva je iz usporedbe podataka u Tablicama 4 i 5, gdje je evidentno da je zamorno oštećenje u uvjetima viših stanja mora veće. Stoga je jasno da bez obzira na softversku podršku kojom raspolažemo, proračunska metodologija igra ogromnu ulogu u konačnim rezultatima.



**Slika 39. Doprinos pojedinih stanja mora zamornom oštećenju strukturnog detalja**



**Slika 40. Doprinos susretnog kuta zamornom oštećenju strukturnog detalja**

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu, analiziran je utjecaj pruženja na zamorni vijek konstrukcijskih detalja ultra velikog kontejnerskog broda kapaciteta 19000 TEU, sprežanjem 3D modela konačnih elemenata konstrukcije i 3D hidrodinamičkog modela potencijalnog strujanja, koristeći programski paket HOMER u skladu sa *WhiSp* metodologijom i to na *WhiSp1* razini. Prikazan je cjelovit postupak primjene direktne proračunske metodologije u problemu određivanja utjecaja pruženja na životni vijek konstrukcijskih detalja. Modalni pristup korišten je za određivanje globalnog hidroelastičnog odziva broda uz tzv. *top-down* postupak u određivanju koncentracija naprezanja konstrukcijskih detalja modeliranih finijom mrežom konačnih elemenata. Također, analiziran je utjecaj uvjeta plovidbe u dva različita skupa stanja mora, svjetsko stanje mora i stanje mora Sjevernog Atlantika, te je analiziran utjecaj koraka susretnog kuta na izračunatu prijenosnu funkciju odziva, a posljedično i na zamorni vijek.

Rezultati provedenih proračuna potvrdili su da linearno pruženja ima veliki utjecaj na zamorni vijek konstrukcijskih detalja, te da mora biti uzeto u obzir kod direktnih proračuna, za brodove relativno veće elastičnosti i brzine plovidbe. Analizom plovidbe u dva stanja mora, pokazano je da utjecaj stanja mora može smanjiti životni vijek konstrukcijskog detalja za tri do 4,5 puta. Nadalje, pokazano je da utjecaj koraka susretnog kuta od  $10^\circ$  u odnosu na korak susretnog kuta od  $30^\circ$ , za plovidbu svjetskim stanjem mora, može imati utjecaj na zamorni vijek i do 44 %. Sličan rezultat dobiven je i u usporedbi koraka susretnog kuta ( $10^\circ$  i  $30^\circ$ ) za plovidbu Sjevernim Atlantikom.

Na temelju analize raspoložive literature i rezultata dobivenih u ovom radu, za očekivati je da će se buduća istraživanja provoditi prvenstveno u smjeru analize utjecaja podrhtavanja na graničnu čvrstoću i zamor. Također, ne smije se zanemariti uloga preostalih mnogobrojnih kombinacija (susretni kut, valne frekvencije, brzina broda itd.) koje mogu imati značajan utjecaj na zamorni vijek strukturnih detalja. Dakle, operativni uvjeti korištenja broda moraju biti preciznije definirani, kako bi se povećala točnost predviđanja zamornog vijeka konstrukcije.

Naposljetku, valja istaknuti da svi analizirani konstrukcijski detalji broda zadovoljavaju zahtjev *WhiSp1* klasne notacije, što je i razumljivo, budući da se radi o brodu koji je izgrađen prije nekoliko godina, te za sada sigurno plovi bez poznatih izvještaja o zamornom oštećenju.

## LITERATURA

- [1] <https://data.worldbank.org/indicator/IS.SHP.GOOD.TU?end=2017&start=2000&view=chart>, (Pristup: 8. listopada 2018.).
- [2] TOMAŠEVIĆ, S.: „*Hidroelastični model dinamičkog odziva kontejnerskih brodova na valovima*“, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [3] <https://www.statista.com/statistics/267603/capacity-of-container-ships-in-the-global-seaborne-trade/>, (Pristup: 8. listopada 2018.).
- [4] MALENICA, Š., VLADIMIR, N., SENJANOVIĆ, I.: „*Hydro structural issues in the design of ultra large container ships*“, Brodogradnja, Vol. 64, No. 3, 2013, pp. 323-345, 2013.
- [5] <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/liner-ships/container-ship-design>, (Pristup: 8. listopada 2018.).
- [6] VLADIMIR, N., MALENICA, Š., SENJANOVIĆ, I., CHOI, B.K., IM, H.I.: „*Spectral fatigue analysis of liquefied natural gas carrier structural detail*“, Design & Construction of LNG Ships, London, 2016.
- [7] VLADIMIR, N.: „*Hidroelastičnost i dinamička izdržljivost velikih kontejnerskih brodova*“, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [8] [https://www.researchgate.net/publication/326670954\\_ISSC\\_2018\\_Technical\\_Committee\\_II2\\_Dynamic\\_Response](https://www.researchgate.net/publication/326670954_ISSC_2018_Technical_Committee_II2_Dynamic_Response), (Pristup: 6. studenog 2018.).
- [9] WU, Y.S., CHEN, R.Z., LIN, J.R.: “*Experimental technique of hydroelastic ship model*”, In Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Oxford, UK.
- [10] BENNETT, S.S., DOWNES, J., DICKSON, T., PHILIPS, A.B., TURNOCK, S.R.: “*Rapid prototyping of flexible models – a new method for model testing?*”, In. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [11] KIM, K.H., KIM, B.W., HONG, S.Y.: “*Experimental study on correlation between slamming impact and whipping vibration for an ultra-large containership*”, In. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [12] HONG, S.Y., KIM, K.W., KIM, B.W.: “*An experimental investigation on bow slamming loads on an ultra-large containership*”, In. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.

- [13] LI, H., WANG, D., ZHOU, C.M., ZHANG, R., REN, H.: “*Springing responses analysis and segmented model testing on a 500,000 DWT ore carrier*”, In. Proc. 35<sup>th</sup> Int. Conf. on Ocean Offshore and Arctic Engineering OMAE, Busan, 2016.
- [14] KIM, Y., AHN, I.G., PARK, S.G.: “*On the second order effect of springing response of blunt ship*”, In. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [15] LAVROFF, J., DAVIS, M.R., HOLLOWAY, D.S., THOMAS, G.A., McVICAR, J.J.: “*Wave impact loads on wave-piercing catamarans*”, Ocean Engineering 131, pp. 263-271, 2017.
- [16] DAVIS, M.R., FRENCH, B.J., THOMAS, B.J.: „*Wave slam on wave piercing catamarans in random head seas*“, Ocean Engineering 135, pp. 84-97, 2017.
- [17] STORHAUG, G.: „*Which sea states are dimensioning for container vessels when whipping is included?*“, ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, 2014.
- [18] STORHAUG, G., ANDERSEN, I.M.V.: „*Extrapolation of model tests measurements of whipping to identify the dimensioning sea states for container ships*“, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 3, pp. 114-122, 2015.
- [19] NAESS, A., GAIDAI, O.: “*Estimation of extreme values from sampled time series*”, Structural safety 31, pp. 325-324, 2009.
- [20] ZHU, S., MOAN, T.: “*Effect of heading angle on wave-induced vibrations and extreme vertical bending moments in a ultra large container ship model*”, Proceedings of the 7th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [21] IM, H.I., VLADIMIR, N., MALENICA, Š., CHO, D.S.: „*Hydroelastic response of 19,000 TEU class ultra large container ship with novel mobile deckhouse for maximizing cargo capacity*“, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 9, No. 3, 2017, pp. 339-349, 2016.
- [22] BISHOP, R.E.D., PRICE, G.: „*Hydroelasticity of Ships*“, Cambridge University Press, 1979.
- [23] [http://www.issc2018.org/images/issc2015/ISSC2015\\_II-2\\_Report.pdf](http://www.issc2018.org/images/issc2015/ISSC2015_II-2_Report.pdf), (Pristup: 2. studeni 2018.).

- [24] STORHAUG, G.: *"The measured contribution of whipping and springing on the fatigue and extreme loading of container vessels"*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 6(4), pp. 1096-1110, 2014.
- [25] STORHAUG, G., KAHL, A.: *"Full scale measurements of torsional vibrations on Post-Panamax container ships"*, Proceedings of the 7th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [26] KI, H.G., PARK, S.G., JANG, I.H.: *"Full scale measurement of 14k TEU containership"*, Proceedings of the 7th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [27] KAHL, A., FRICKE, W., PAETZOLD, H., SELLE, H.: *"Whipping investigations based on large-scale measurements and experimental fatigue testing"*, International Journal of Offshore and Polar Engineering 25(4), pp. 247-254, 2015.
- [28] KAHL, A., SELLE, H., STORHAUG, G.: *"Full-scale measurement and hull monitoring on ships"*, International Institute of Welding, Commission V, V-1675-15 (XV-1494-15), 2016.
- [29] THOMPSON, I.: *"Validation of naval vessel spectral fatigue analysis using full scale measurements"*, Marine Structures 49, pp. 256-268, 2016.
- [30] MAGOGA, T., AKSU, S., CANNON, S., OJEDA, R., THOMAS, G.: *"Comparison between fatigue life values calculated using standardized and measured stress spectra of naval high-speed light craft"*, In Proc. 13th Int. Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS, Copenhagen, Denmark, 2016.
- [31] GAIDAI, O., STORHAUG, G., NAESS, A.: *"Extreme large cargo ship panel stresses by bivariate ACER method"*, Ocean Engineering 123, pp. 432-439, 2016.
- [32] JENSEN, J.J., ANDERSEN, I.M.V., SENG, S.: *"Stochastic procedures for extreme wave induced responses in flexible ships"*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 6, pp. 1148-1159, 2014.
- [33] ANDERSEN, I.M.V., JENSEN, J.J.: *"Extreme value prediction of the wave-induced vertical bending moment in large container ships"*, Proceedings of the 7th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Split, 2015.
- [34] ANDERSEN, I.M.V.: *"Full scale measurements of the hydro-elastic response of large container ships for decision support"*, Doktorska disertacija, Technical University of Denmark, 2014.

- [35] VLADIMIR, N., MALENICA, Š., SENJANOVIĆ, I., CHOI, B.K., IM, H.I., CHO, D.S.: „*Structural design of ultra large ships based on direct calculation approach*“, Pomorski zbornik, Posebno izdanje, pp. 63-79, 2016.
- [36] BUREAU VERITAS,: „*Whipping and springing assessment*“, Rule note NR 583, Paris, 2012.
- [37] <https://www.veristar.com/portal/veristarinfo/detail/software/veristarFamily/HOMER%20HYDRO-STRUCTURE%20INTERACATIONS/Homer>, (Pristup 15. listopada 2018.).
- [38] IM, H.I., VLADIMIR, N., MALENICA, Š., CHO, D.: „*Quasi-static response of a 19,000 TEU class ultra large container ship with a novel mobile deckhouse for maximizing cargo capacity*“, Transactions of FAMENA, XLI-3, 2017, pp. 45-56, 2017.
- [39] <https://www.marineinsight.com/shipping-news/hyundai-heavy-industries-completes-worlds-largest-containership/> (Pristup: 28. studenog 2018.).
- [40] IM, H.I., VLADIMIR, N., MALENICA, Š., CHO, D.S., De LAUZON, J., RYU, H.R.: „*Hydroelastic analysis of 19,000 TEU ultra large container carrier*“, The Society of Naval Architects of Korea, Busan, 2016.

## **PRILOG**

### **I. CD-R disc**